

BADANIA DOŚWIADCZALNE ELEMENTÓW I KONSTRUKCJI BETONOWYCH

PUBLIKACJA POD PATRONATEM SEKCJI KONSTRUKCJI
BETONOWYCH KOMITETU INŻYNIERII LĄDOWEJ I WODNEJ PAN

ZESZYT NR 9

**Experimental
research on
RC beams
strengthened
with CFRP
strips**

**Doświadczalne badania żelbetowych
belek wzmocnionych taśmami CFRP**

Maria E. Kamińska
Renata Kotynia

Department
of Concrete Structures
Technical University
of Lodz, Poland

Łódź 2000
Katedra Budownictwa Betonowego
Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska
Politechniki Łódzkiej

Recenzent / Reviewer
prof. dr hab. inż. Wojciech Radomski

Tłumaczenie / Translation
mgr inż. Maciej Winiarski

Opracowanie wyników pomiarów i skład tekstu / Preparing of measurement results and text
mgr inż. Jacek Filipczak

©2000 Katedra Budownictwa Betonowego, Łódź, Poland

ISSN 1230-6010

<https://doi.org/10.34658/kbb.2000.9>

DOI 10.34658/kbb.2000.9

Katedra Budownictwa Betonowego Politechniki Łódzkiej
Al. Politechniki 6, 93-590 Łódź, Poland
tel. (48) (42) 6313575, fax (48) (42) 6313584, e-mail: renata.kotynia@p.lodz.pl

STRESZCZENIE

Program doświadczalnych badań objął 8 belek żelbetowych o przekroju 150 x 300mm i rozpiętości 3000mm. Belki różniły się stopniem zbrojenia zwykłego oraz długością taśmy wzmacniającej CFRP, miejscem jej usytuowania i typem taśmy. W badaniach zastosowano taśmy typu S i M, o modułach sprężystości odpowiednio około 170GPa i 210GPa. W dwóch belkach zastosowano w strefach przypodporowych dodatkowe taśmy przyklejane na bocznych powierzchniach, w celu poprawy warunków zakotwienia taśmy głównej. Belki były obciążane dwiema siłami skupionymi (seria I – 6 elementów) lub jedną siłą skupioną, usytuowaną w środku rozpiętości (seria II – 2 elementy). Wszystkie belki zniszczyły się na skutek odspojenia taśmy CFRP.

Podczas badań ujawniły się dwa mechanizmy zniszczenia, różniące się miejscem występowania i obrazem odspojenia taśmy. Pierwszy z nich („P”) miał miejsce w strefie przypodporowej belek, w pobliżu końca taśmy wzmacniającej. Taśma odspajała się wraz z betonem otuliny zbrojenia na krótkim odcinku, obejmującym strefę przypodporową, nie osiągając punktu przyłożenia siły obciążającej. Drugi sposób zniszczenia („Z”) charakteryzował znacznie dłuższy odcinek odspojenia taśmy, obejmujący nie tylko strefę przypodporową, lecz także obszar czystego zginania. Zniszczenie występowało w warstwie kleju, a tylko lokalnie wraz z taśmą odspajały się fragmenty otuliny.

Badania wykazały, że nośność taśmy na rozciąganie nie może być wykorzystana, gdyż wcześniej odspaja się ona od powierzchni elementu. Stopień wzmocnienia elementu może być jednak wyraźny, zwłaszcza w elementach o niskim stopniu zwykłego zbrojenia. Efekt wzmocnienia można zwiększyć stosując taśmy o większym współczynniku sprężystości lub wprowadzając wstępne sprężenie taśm przed ich przyklejeniem. Do analizy obliczeniowej zastosowano nieliniowy model betonu z uwzględnieniem zasady „tension stiffening”.

SUMMARY

The research program included 8 RC beams with the cross-section of 150×300mm and span of 3000mm. The beams were differed in steel reinforcement ratio, length, location and type of the CFRP strip. The strips of type S and M with the modulus of elasticity 170GPa and 210 GPa were used in the research. In order to improve anchorage conditions of the main strip additional strips were bonded to the both sides of two beams at the support region. The beams were loaded with two forces (series I – 6 elements) or one force located in the middle of the beam span (series II – 2 elements). The strip debonding caused failure of all beams.

Two modes of failure differing in position and image of de-bonded strip appeared in tests. The first one (“P”) was appeared in the support region close to the end of the strip. The strip de-bonded together with concrete cover on short distance included only support region and did not reach the load point. The second mode of failure (“Z”) was distinguished longer debonding distance of the strip included both support and pure bending region. In this case de-bonding of the strip occurred by delamination in the adhesive layer and only locally in the concrete cover.

The result of the research indicated that tension strength of the strip couldn't be reached because of its earlier de-bonding from the beam surface. Strengthening ratio of the beam can be sufficient especially for elements with low steel reinforcement ratio. Strengthening effect can be increased by application of the strip with high elasticity modulus or strip prestressing before bonding to the element. Non-linear-elastic-plastic model of concrete with tension stiffening principle was assumed in computational analysis.

SPIS TREŚCI

1. Wprowadzenie	7
2. Program badań	9
3. Opis badań	11
3.1. Materiały	11
3.1.1. Stal zbrojeniowa	11
3.1.2. Beton	12
3.1.3. Taśmy CFRP	14
3.1.4. Zaprawa klejowa Sikadur®30.	15
3.2. Belki	16
3.2.1. Zbrojenie i betonowanie belek	16
3.2.2. Technologia wzmocnienia belek	16
3.3. Stanowisko badawcze	19
3.4. Pomiary	20
4. Wyniki badań	24
4.1. Mechanizmy zniszczenia belek	24
4.2. Odkształcenia i krzywizny	26
4.3. Zarysowanie i ugięcie	31
5. Obliczeniowy opis zachowania się belek pod obciążeniem	33
6. Rodzaje taśm a możliwości ich wykorzystania	36
6.1. Przekroje krytyczne	36
6.2. Stopień zbrojenia a efekt wzmocnienia belek	38
7. Podsumowanie	41
Podziękowanie	42
Bibliografia	42
Prace nie przywoływane w tekście	42
Załącznik	43

CONTENTS

1. Introduction	7
2. Research program	9
3. Description of experimental tests	11
3.1. Materials	11
3.1.1. Reinforcing steel	11
3.1.2. Concrete	11
3.1.3. CFRP strips	14
3.1.4. Sikadur®30 adhesive	15
3.2. Beams	16
3.2.1. Reinforcing and casting of the beams	16
3.2.2. Strengthening technique of the beams	16
3.3. Test stand	19
3.4. Measurements	20
4. Test results	24
4.1. Failure modes of beams	24
4.2. Strains and curvatures	26
4.3. Cracking and deflection	31
5. Theoretical analysis of the loaded beams behaviour	33
6. Types of the strips and effectiveness of their usage	36
6.1. Critical cross-sections	36
6.2. Reinforcement ratio and effectiveness of beam strengthening	38
7. Conclusions	41
Acknowledgement	42
References	42
References not quoted in the text	42
Appendix	43

OZNACZENIA

b	- szerokość belki
d	- wysokość użyteczna przekroju
e	- odległość końca taśmy od podpory
f_c	- wytrzymałość betonu na ściskanie w jednoosiowym stanie naprężenia
$f_{c,cube}$	- wytrzymałość betonu na ściskanie określona na kostkach o boku 150 mm
$f_{ct,sp}$	- wytrzymałość betonu na rozciąganie określona metodą rozłupywania
f_p	- wytrzymałość taśmy na rozciąganie
f_t	- wytrzymałość stali zbrojeniowej na rozciąganie
f_y	- granica plastyczności stali zbrojeniowej
h	- wysokość przekroju
l	- rozpiętość
v	- ugięcie belki
x	- wysokość strefy ściskanej przekroju
A_p	- pole powierzchni taśmy
A_{s1}	- pole powierzchni zbrojenia rozciąganego
A_{s2}	- pole powierzchni zbrojenia ściskanego
E_c	- moduł sprężystości betonu
E_p	- moduł sprężystości taśmy CFRP
E_s	- moduł sprężystości stali
F	- siła
M_R	- nośność przekroju na zginanie
κ	- krzywizna
ϵ_c	- odkształcenie jednostkowe betonu
ϵ_{cu}	- graniczne odkształcenia betonu
ϵ_{sy}	- odkształcenie stali odpowiadające granicy plastyczności
ϵ_p	- odkształcenie taśmy
ϵ_{plim}	- odkształcenie taśmy przy odspojeniu
ϵ_{pu}	- odkształcenie taśmy przy zerwaniu
ρ_p	- stopień zbrojenia taśmą
ρ_s	- stopień zbrojenia stalą

NOTATION

b	- width of a cross-section
d	- effective depth of a cross-section
e	- distance the end of a strip from a support
f_c	- compressive cylinder strength of concrete
$f_{c,cube}$	- concrete cube 150×150×150mm compressive strength
$f_{ct,sp}$	- splitting tensile strength of concrete
f_p	- tensile strength of CRFP strip
f_t	- tensile strength of steel reinforcement
f_y	- yield strength of steel reinforcement
h	- depth of a cross-section
l	- span
v	- deflection of a beam
x	- neutral axis depth
A_p	- area of strip
A_{s1}	- area of reinforcement within the tension zone
A_{s2}	- area of reinforcement in the compression zone
E_c	- tangent modulus of elasticity of concrete
E_p	- modulus of elasticity of CRFP strip
E_s	- modulus of elasticity of steel reinforcement
F	- force
M_R	- flexural load bearing capacity
κ	- curvature
ϵ_c	- compressive strain in the concrete
ϵ_{cu}	- ultimate compressive strain in the concrete
ϵ_{sy}	- strain of yielding steel reinforcement
ϵ_p	- strain of CRFP strip
ϵ_{plim}	- strain of a strip during debonding
ϵ_{pu}	- ultimate strain of a strip in failure
ρ_p	- strip ratio
ρ_s	- steel reinforcement ratio

1. WPROWADZENIE

W pracy rozważane są problemy wzmocniania żelbetonowych belek za pomocą materiałów kompozytowych, na bazie włókien węglowych (CFRP). Nieznane dotąd na rynku budowlanym kompozyty, dzięki swoim korzystnym właściwościom fizycznym i wytrzymałościowym stały się konkurencyjne dla tradycyjnych materiałów używanych do wzmocnień konstrukcji.

Materiały kompozytowe FRP (Fibre Reinforced Plastics), zbudowane są z włókien węglowych, aramidowych lub szklanych osadzonych w matrycy - żywicy epoksydowej. Dzięki wysokiej wytrzymałości, trwałości i możliwości osiągnięcia różnych kształtów, kompozyty produkowane są w postaci prętów zbrojeniowych, cięgien, kabli sprężających, taśm, mat i arkuszy. W porównaniu z możliwościami tradycyjnych materiałów, takich jak stal, materiały FRP charakteryzują się [1]:

- dużą wytrzymałością na rozciąganie, do 3200 MPa,
- modułem sprężystości, który zmienia się w granicach od $1/5E_s$ stali zbrojeniowej do parokrotnej wartości E_s ,
- wysoką odpornością na większość czynników korozyjnych,
- brakiem właściwości magnetycznych,
- wysoką odpornością na zmęczenie.

Tablica 1.1. Sika® CarboDur System [2]

Taśmy Sika® CarboDur / Sika® CarboDur Strips

Typ taśmy Type of strip		Gęstość Density g/cm ³	Średnia wytrzymałość na rozciąganie Mean tensile strength MPa	Charakterystyczna wytrzymałość na rozciąganie Characteristic tensile strength MPa	Moduł sprężystości Modulus of elasticity GPa	Odkształcenie przy zerwaniu Strain in rupture %	Szerokość Width mm	Grubość Thickness mm
S	S512	1.5	3050	> 2800	> 165	> 1.7	50	1.2
	S612						60	
	S812						80	
	S1012						100	
	S1212						120	
	S1512						150	
	S614						60	1.4
	S914						90	
S1214	120							
M	M614	1.6	2900	> 2400	>210	> 1.2	60	1.4
	M914						90	
	M1214						120	
H	H514	1.6	1450	>1300	> 300	> 0.45	50	1.4

Zaprawa klejowa Sikadur®-30 / SikaDur®-30 Adhesive Mix

Gęstość, kg/m ³ (po wymieszaniu składników A+B)	Mass density, kg/m ³ (after mixing A+B components)	1770
Skurcz, %	Shrinkage, %	0.04
Temperatura przejścia w szkliwo, °C / °K	Glaze transition temperature, °C / °K	+62 / +335
Moduł sprężystości, GPa	Modulus of elasticity, GPa	12.8
Przyczepność do wilgotnego betonu, MPa	Adhesion to moist concrete, MPa	4
Przyczepność do suchego betonu, MPa	Adhesion to dry concrete, MPa	5
Wytrzymałość na ścinanie, MPa	Shear strength, MPa	15
Współczynnik rozszerzalności, 1/°K	Coefficient of expansion, 1/°K	9×10^{-5} (-10 ÷ +40°K)

Taśmy CFRP (Carbon Fibre Reinforced Plastic) produkowane są w procesie przeciągania (pultrusion) włókien węglowych przez kąpiel substancji impregnującej, pod stałym naciskiem wałków formujących. Około 24000 naciągniętych równoległych włókien zostaje utwardzonych w matrycy żywicy epoksydowej pod wpływem wysokiej temperatury. W wyniku tej technologii otrzymuje się taśmy o dowolnej długości (250 do 500 m w zwoju). Dzięki jednokierunkowemu układowi włókien taśmy charakteryzują się bardzo wysoką wytrzymałością na rozciąganie w kierunku podłużnym, przy niewielkiej wytrzymałości w kierunku prostopadłym do włókien. Grubość taśm dochodzi do 1.4mm, a szerokość do 120mm. Uzupełnieniem systemu wzmocnień CFRP poza taśmami są maty (wraps), arkusze (sheets) i kształtki (L-shaped strips).

Współpracę taśm i mat z podłożem zapewnia warstwa szczipna (zaprawy klejowej) na bazie żywicy epoksydowej. W zależności od składu użytego kleju można uzyskać różne jego właściwości mechaniczne. Najczęściej stosuje się kleje dwuskładnikowe o wysokiej wytrzymałości. Zaprawa klejowa powinna charakteryzować się brakiem skurczu, długim czasem trwania stanu plastycznego, odpornością na różnice temperatur oraz stabilnością na powierzchniach pionowych i sufitowych

Właściwości mechaniczne i wytrzymałościowe taśm CFRP i zaprawy klejowej podano w tabelicy 1.1 według [2].

CFRP Strips (Carbon Fibre Reinforced Plastic) are produced in pultrusion process, i.e. pulling carbon fibres through a bath of impregnating substances under constant pressure of rolls. About 24000 tensioned parallel fibres are fixed in the matrix in high temperature. As the result of this technology, strips of arbitrary length (250 to 500m in a roll) can be produced. Thanks to the unidirectional arrangement of fibres they are characterised by very high tensile strength in longitudinal direction, with low strength in the direction perpendicular to fibres. The thickness of strips reaches 1.4 mm and their width - up to 120mm. CFRP reinforcing system is completed by fabrics and L-shaped strips.

A layer of adhesive based on epoxy resin assures co-operation of strips and wraps with concrete base. Various mechanical properties can be obtained depending on the composition, of the applied adhesive. Two-component, high strength adhesives are used most frequently. The adhesive mix should be characterised by absence of shrinkage, long duration of plastic state, resistance to temperature variation and stability in vertical and ceiling positions.

Mechanical and strength properties of CFRP strips are given in Table 1.1 after [2].

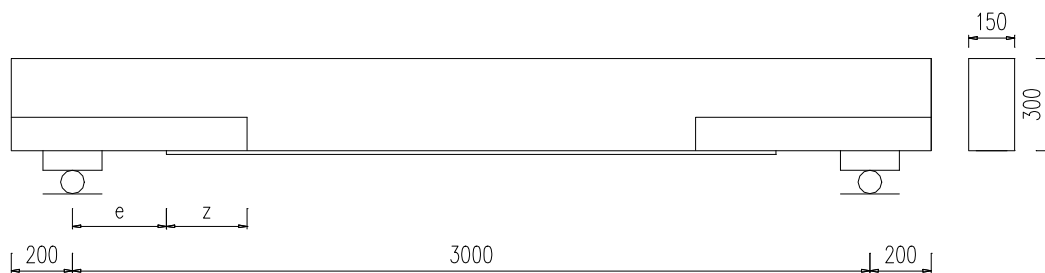
2. PROGRAM BADAŃ

Założono zbadanie sześciu jednoprzęsłowych, wolno-
podpartych żelbetowych belek o przekroju prostokątnym
150×300mm i rozpiętości 3000mm. Wszystkie belki
wzmocniono taśmami z włókien węglowych CFRP, nakle-
janymi na rozciąganej powierzchni elementów za pomocą
kleju na bazie żywicy epoksydowej.

W rzeczywistych konstrukcjach rzadko istnieje moż-
liwość doprowadzenia końców taśm do podpory,
uwzględniono to w badaniach kończąc taśmę przed pod-
porą. W części belek, aby poprawić warunki zakotwienia
taśmy głównej, zastosowano dodatkowe taśmy przyklejo-
ne na bocznych powierzchniach belek.

Jako parametry zmienne przyjęto:

- trzy stopnie zbrojenia zwykłego: $\rho=0.0039$; 0.0056; 0.008;
- trzy odległości końców taśm CFRP (przyklejanych do spodniej powierzchni belki) od osi podpór: $e=150$; 250; 300mm (rys. 2.1);
- trzy długości zakładu taśm bocznych z taśmą główną: $z=200$; 350; 500mm (rys. 2.1);
- dwa rodzaje taśm: M i S.



Rys. 2.1. Sposób wzmocnienia belek

Fig. 2.1. Arrangement of CFRP strips used for beam strengthening

Założono, że belki będą wzmocniane przed obciążeniem. W celu określenia wpływu wstępnego zarysowania belki przed przyklejeniem taśmy przyjęto jednak, że jedna z belek zostanie wzmocniona po zarysowaniu, tj. przy obciążeniu wynoszącym około 0.6 siły niszczącej (określonej dla belki nie wzmocnionej). W belkach z niesymetrycznie przyklejonymi taśmami, po zniszczeniu w obszarze jednej z podpór, zmniejszono rozpiętość do 2100mm przesuwając podpore, przy której wystąpiło zniszczenie, w kierunku drugiej. Aby zachować taką samą odległość sił obciążających od osi podpór zmieniano trawers na krótszy, uzyskując rozstaw sił obciążenia 500mm.

Po zbadaniu sześciu belek serii podstawowej (seria I) i przeanalizowaniu wyników, postanowiono wykonać badania uzupełniające, obejmujące dwie belki obciążone jedną siłą skupioną w środku rozpiętości (seria II). Badania tych dwóch belek miały potwierdzić jeden z modeli zniszczenia zaobserwowany w badaniach serii podstawowej, dotyczący obszaru zginania.

Ogółem wykonano zatem badania ośmiu elementów. Szczegółową charakterystykę elementów podano w tablicy 2.1.

2. RESEARCH PROGRAM

Tests on six single span, simply supported beams of 150×300mm rectangular cross-section and 3000mm span were assumed. All beams were strengthened with CFRP strips, bonded to the tension surface of the elements using adhesive on epoxy resin base.

In real structures possibility rarely exists to extend strip ends to supports. This was taken into account in tests by stopping the strip short of the support. In a part of beams additional strips bonded to side surfaces of the beams were used to improve the anchorage of the main strip.

Following variable parameters were adopted:

- three ratios of conventional reinforcement: $\rho=0.0039$; 0.0056; 0.008;
- three CFRP strip (bonded to the underside of the beam) end distances from the support axes: $e=150$; 250 and 300mm (Fig. 2.1);
- three overlap lengths of side strips with the main strip: $z=200$; 350; 500mm (Fig. 2.1)
- two strip types: M and S.

It was assumed that the beams shall strengthened before loading. In order to assess the influence on the initial cracking of the beam before bonding the strip, it was adopted that one of the beams shall be strengthened after cracking, i.e. at load amounting to 0.6 of the force at failure (defined for the not strengthened beam). In beams with unsymmetrical bonded strips, after failure occurred in the support region of one support, the span was diminished to 2100mm by shifting the support near which the failure occurred towards the other support. In order to maintain the same distance of loads to support axes, the loading beam was shortened giving the distance between loading forces to 500mm.

Having investigated six beams of the basic series (I series) and analysed the results, it was decided to carry out complementary tests, including two beams, each loaded by a single concentrated force at mid-span (II series). Investigations on these two beams were carried out to confirm one of the modes of failure found in tests on the basic series concerning the bending region.

In all, tests on eight elements were therefore carried out. Detailed characteristics of elements are given in Table 2.1.

Tablica 2.1. Charakterystyka badanych belek
 Table 2.1. Details of tested beams

Belka Beam symbol	Stopień zbrojenia / pręty Reinforcement ratio / bars	taśma CFRP / CFRP strip		
		typ / type	e, mm	z, mm
B-04/S	0.0039 2#10	S	150 300	-
B-04/M		M	250	200 S, M
B-06/S	0.0056 2#12	S	250 250	350 500
B-08/S	0.0084 3#12	S	150	-
BO-08/S		S	150	-
B-04/0.5S	0.0039 2#10	S	150	-
BF-04/0.5S ¹⁾	0.0039 2#10	S	150	-
BF-06/S	0.0056 2#12	S	150	-
1) Połówki taśmy przyklejone na bocznych powierzchniach belki 1) Strip halves bonded to both sides of the beam				

Przewidziano także następujące badania materiałów użytych do wykonania i wzmocnienia belek:

- określenie wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie oraz modułu sprężystości betonu,
- określenie wytrzymałości na rozciąganie i modułu sprężystości stali zbrojeniowej oraz zależności $\sigma_s - \varepsilon_s$,
- określenie wytrzymałości na rozciąganie i modułu sprężystości taśm (M, S).

Following investigations on materials used in making and strengthening the beams are also foreseen:

- determination of compressive and tensile strength and modulus of elasticity of concrete,
- determination of tensile strength and modulus of elasticity of reinforcing steel and $\sigma_s - \varepsilon_s$ relationship,
- determination of tensile strength and modulus of elasticity of M and S strips.

3. OPIS BADAŃ

3.1. Materiały

3.1.1. Stal zbrojeniowa

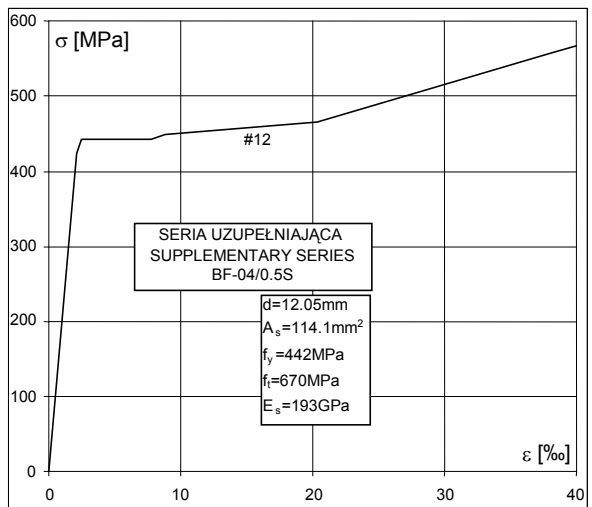
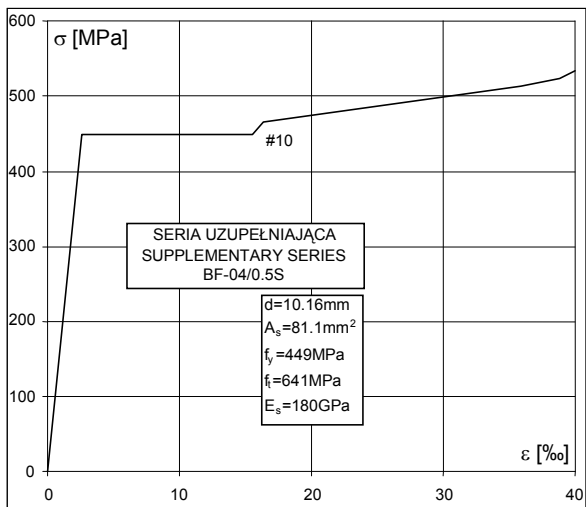
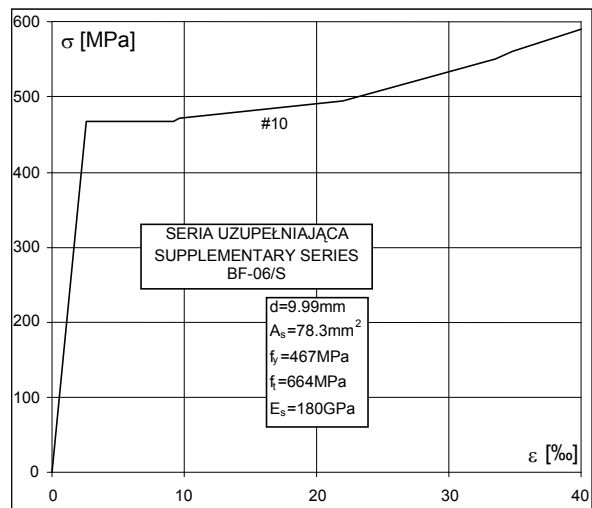
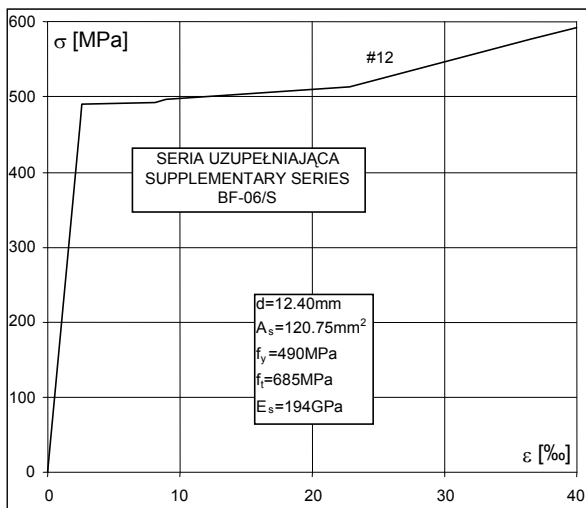
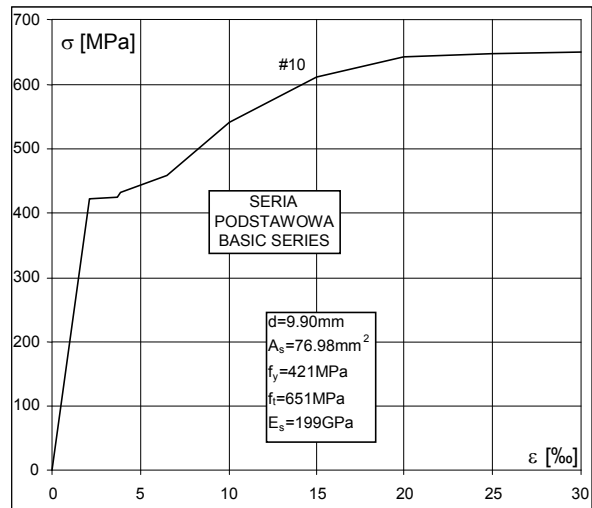
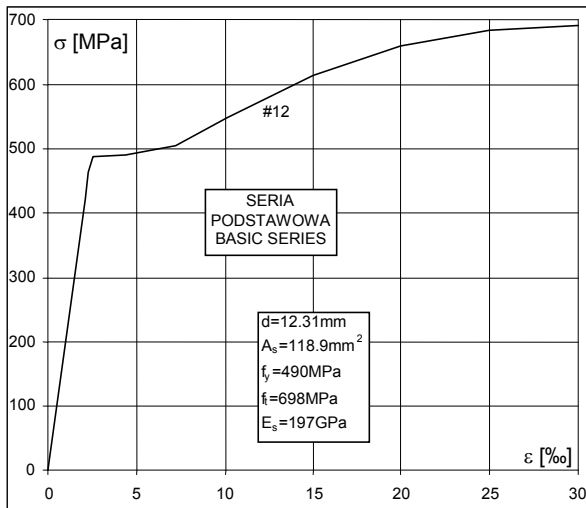
Zbrojenie podłużne górne i dolne belek wykonano ze stali żebrowanej klasy AIII o znaku 34GS i nominalnych średnicach 10 i 12mm.

3. DESCRIPTION OF EXPERIMENTAL TESTS

3.1. Materials

3.1.1. Reinforcing steel

Top and bottom longitudinal reinforcement of beams was of ribbed steel bars, class AIII, 34GS symbol and nominal diameters 10 and 12mm.



Rys. 3.1. Zależność σ - ε dla stali zbrojeniowej
Fig. 3.1. σ - ε relationship for reinforcing steel

Strzemiona w belkach serii podstawowej wykonano ze stali gładkiej klasy A-0 o znaku St0S i średnicy 6mm, a w serii uzupełniającej z drutu D1. Z każdego odcinka użytego do zbrojenia belek pobrano próbki w celu zbadania cech wytrzymałościowych. Badania próbek stali przeprowadzono w maszynie wytrzymałościowej ZD20, wyposażonej dodatkowo w rejestrator wydłużeń o bazie pomiarowej 50mm i powiększeniu od 200:1 do 2000:1. Pomiar odkształceń wykonano przy powiększeniu 200:1 w zakresie do 40‰, a w celu uściślenia wartości współczynników sprężystości stali zastosowano powiększenie 1000:1 i zakres pomiaru do 8‰. Wydłużenia próbek aż do chwili zerwania rejestrowano z powiększeniem 5:1 i na ich podstawie określono odkształcenia ϵ_u , przy maksymalnym obciążeniu.

Wytrzymałościową charakterystykę stali zbrojeniowej dla belek obu serii przedstawiono na rys. 3.1.

3.1.2. Beton

Mieszanki betonowe wykonano z piasku kopalnianego, żwiru sortowanego i cementu portlandzkiego 35 bez dodatków. Skład mieszanki na 1m³ podano w tablicy 3.1.

Tablica 3.1. Skład mieszanki betonowej
Table 3.1. Composition of concrete mix

	Ilość na m ³ , [kg] / kg per m ³
żwir / gravel	936
piasek / sand	936
cement / cement	274
woda / water	200
razem / sum:	2346
w/c / water-cement ratio	0.73
k/c / aggregate-cement ratio	6.83

Przy betonowaniu każdej belki wykonano sześć próbek walcowych o średnicy 150mm i wysokości 300mm oraz dziewięć kostkowych (sześciennych) o boku 150mm. Wytrzymałość na ściskanie ($f_{c,cube}$) i rozciąganie metodą rozłupywania ($f_{ct,sp}$) określono na próbkach kostkowych, a wytrzymałość słupową (f_c) oraz moduł sprężystości betonu (E_c) na próbkach walcowych. Określenie cech wytrzymałościowych betonu każdej belki wykonywano w dniu jej badania, w maszynie wytrzymałościowej FORM + TEST (PRÜFSYSTEM Typ 107/3000A).

Wyniki cech wytrzymałościowych betonu:

- wytrzymałość na ściskanie ($f_{c,cube}$),
- wytrzymałość na rozciąganie ($f_{ct,sp}$)
- wytrzymałość słupową (f_c),
- moduł sprężystości (E_c)

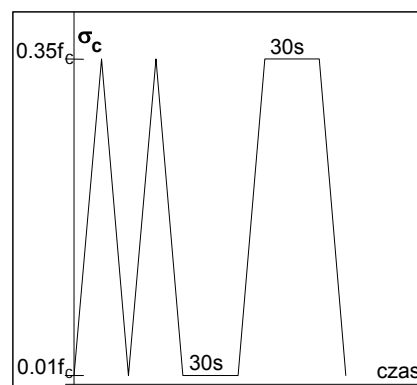
zestawiono w tablicy 3.2. Odkształcenia podłużne próbek walcowych mierzono za pomocą przyrządu spełniającego wymagania DIN 1048, a wartości modułu sprężystości betonu ustalono z przedziału obciążeń (0.01 do 0.35) f_c w ostatnim cyklu obciążania (rys. 3.2). Prędkość przykładanania obciążenia wynosiła 11±0.5kN/s.

Stirrups in basic series of beams were made of round bars, A-0 class, St0S symbol and 6mm dia.; in complementary II series of beams stirrups were of D1 wire. From each steel bar used for reinforcement, samples were taken to determine strength properties. Tests on samples were carried out in ZD20 testing machine provided additionally with extension register of 50mm measuring base and 200:1 to 2000:1 enlargement. Strain measurements were carried out using 200:1 enlargement within 40‰ range and to precise the value of modulus of elasticity of steel, 1000:1 enlargement was used over 8‰ measurement range. Extensions of samples up to rupture were recorded with enlargement 5:1 and strains ϵ_u were determined at maximum load.

Strength characteristics of reinforcing steel in both series of beams are presented in Fig. 2.2

3.1.2. Concrete

Concrete mixes were prepared using pit sand, graded gravel and Portland cement 35 without additives. Composition of 1 m³ mix is given in Table 3.1.



Rys. 3.2. Zasada określania wartości współczynnika sprężystości betonu

Fig. 3.2. The principle of determination of elasticity modulus of concrete

Six cylindrical samples of 150mm dia. and 300mm height were cast at the concreting of each beam, as well as nine cube samples of 150mm each. Compressive strength ($f_{c,cube}$) and tensile strength by splitting ($f_{ct,sp}$) were determined on cubic samples while column strength (f_c) and modulus of elasticity (E_c) - on cylindrical samples. Definition of strength properties of concrete for each beam was carried out on the day of its casting, using FORM + TEST (PRÜFSYSTEM type 107/3000A) strength testing machine.

The results of strength properties of concrete:

- compressive strength ($f_{c,cube}$),
- tensile strength ($f_{ct,sp}$),
- column strength (f_c),
- modulus of elasticity (E_c),

are presented in Table 4.1. Longitudinal displacements of cylindrical samples were measured using apparatus satisfying DIN 1048 requirements; the value of modulus of elasticity of concrete was determined for load interval (0.01 to 0.35) f_c in the last cycle of loading (Fig. 3.2). The increment of load application was 11±0.5kN/s.

Tablica 3.2. Charakterystyka wytrzymałościowa betonu

Table 3.2. Strength properties of concrete

Lp.	Symbol elementu Symbol of element	Wiek betonu Age of concrete dni days	E _c [MPa]		f _c [MPa]		f _{c, cube} [MPa]		f _{ct, sp} [MPa]		f _c
			wyniki results	średnia mean	wyniki results	średnia mean	wyniki results	średnia mean	wyniki results	średnia mean	f _{c, cube}
1	B-04/S1	81	23900 24200 22400 23600 23100	23400	29 26 29 31 28 28	28,5	32 37 32 31 34	33,2	-	-	0,858
2	B-04/M	60	24800 23400 26800 24800 24100 25800	24950	31 29 32 27 28 31	29,7	32 32 32 34 36	33	2,8 2,7 3,6	3,03	0,895
3	B-06/S	105	28300 27500 26300 26800 28800 26600	27383	33 35 33 31 32 30	32,3	35 35 35 37 35 35	35,3	3,1 2,2 3,3	2,87	0,915
4	B-08/S	113	25900 24200 26900 28200 30200 28400	27300	33 32 30 34 37 37	33,8	40 38 38 47 46 48	42,8	2,6 3,1 3,4	3,03	0,790
5	B-04/S2	189	29100 28100 29300 30900 27800	29040	38 34 38 35 37 37	36,5	51 51 49 52 56 49	51,33	3,0 3,2 3,4	3,20	0,711
6	BO-08/S	251	29600 31900 29300 29800 28200	29760	32 37 38 37 36 36	36,0	37 42 39 40 38 38	39,0	2,8 3,0 2,7	2,83	0,923
7	BF04/0,5S	38	26700 30100 29000 28600	28600	29 34 36 33	33,0	34 34 41 45	38,5	2,4 2,7 2,6	2,56	0,857
8	BF-06/S	45	30100 29000 27000 29500	28900	29 36 35 30	32,5	33 33 43 45	38,5	2,4 3,0 2,7	2,70	0,844

3.1.3. Taśmy CFRP

W badaniach zastosowano taśmy z włókien węglowych produkcji Sika CarboDur typ S812 i M1214. Taśmy Sika® CarboDur zostały dostarczone w zwojach. Z każdego rodzaju taśmy pobrano cztery próbki w celu zbadania cech wytrzymałościowych. Do obu końców każdej próbki doklejono aluminiowe płaskowniki w celu umożliwienia zakotwienia próbek taśm w szczękach maszyny wytrzymałościowej. Wszystkie próbki badano w maszynie wytrzymałościowej UFP 400.

Wyniki badania taśm CFRP na rozciąganie zamieszczono w tablicy 3.3 i na rys. 3.3.

3.1.3. CFRP strips

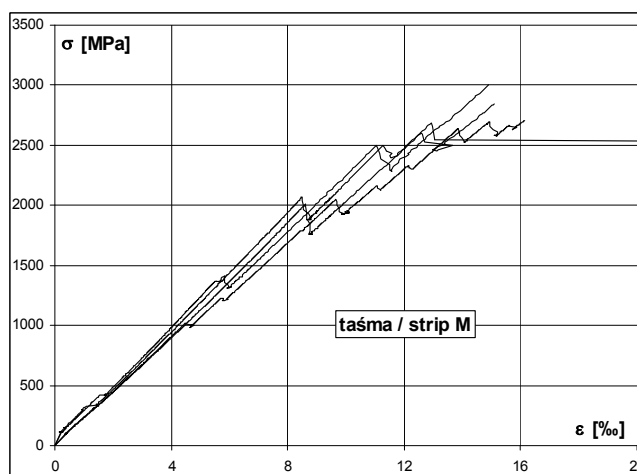
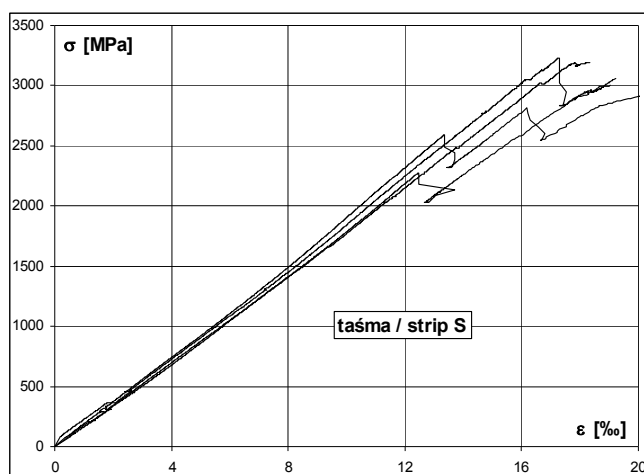
Carbon fibre strips produced by Sika CarboDur, of modes S812 and M1214 were used in tests. Sika® CarboDur strips were supplied in laps. To test strength properties, four samples were taken from each type of strip. Aluminium flats were bonded to each end of strip to enable strip samples to be anchored in testing machine jaws. All samples were tested using UFP400 testing machine.

Results of tensile tests on CFRP strips are shown in Table 3.3 and in Fig. 3.3.

Tablica 3.3. Charakterystyka wytrzymałościowa taśm CFRP

Table. 3.3. Strength properties of CFRP strips

Typ taśmy Type of strip	Szerokość Width mm	Grubość Thickness mm	Pole przekroju Cross-section area mm ²	Wytrzymałość na rozciąganie f_p Tensile strength MPa		Moduł sprężystości, E_p Modulus of elasticity MPa		Odształcenia przy zerwaniu ϵ_{pu} Strain at rupture ‰	
				wyniki results	średnie mean	wyniki results	średnie mean	wyniki results	średnie mean
M	14,2	1,4	19,88	2682	2742	224400	220400	12,0	12,4
	15,3	1,4	21,42	2797		216400		12,9	
	14,4	1,4	20,16	2781		219200		12,7	
	15,6	1,4	21,84	2710		221400		12,2	
S	14,3	1,2	17,16	3137	2915	172100	171900	18,2	17,0
	15,4	1,2	18,48	2658		172200		15,5	
	14,4	1,2	17,28	2922		165800		17,0	
	14,6	1,2	17,52	2941		177500		17,1	



Rys. 3.3. Zależność σ - ϵ dla taśmy CFRP typu S i M

Fig. 3.3. σ - ϵ relationship for S and M types of CFRP strips

Uzyskane w badaniu wytrzymałościowym wyniki porównano z wartościami podanymi przez producenta [2]. Stwierdzono bardzo dobrą zgodność wartości wytrzymałości na rozciąganie i modułu sprężystości dla obu taśm typu S i M.

Results obtained in strength tests were compared with the values given by the producer [2]. Very good agreement has been found between tensile strength and modulus of elasticity values for both types of strips, S and M.

I tak dla taśmy typu S: $E_{test}=171.9\text{GPa}$, $E_{produc.}>165\text{GPa}$, dla taśmy typu M: $E_{test}=220.4\text{GPa}$, $E_{produc.}>210\text{GPa}$. W trakcie badania, przy zwiększaniu obciążenia poszczególne włókna taśmy zaczynały pękać, co doprowadzało do zerwania całej taśmy.

Na rys. 3.4 pokazano próbkę taśmy przygotowaną do badania oraz w chwili zniszczenia.

For S strip: $E_{test}=171.9\text{GPa}$, $E_{produc.}>165\text{GPa}$, and for M strip, $E_{test}=220.4\text{GPa}$, $E_{produc.}>210\text{GPa}$. At load increase during the test individual fibres of the strip began to break and this led to the rupture of the entire strip.

A sample of the strip before and after at failure is shown in Figs 3.4.



Rys. 3.4. Taśma CFRP przed badaniem, po badaniu oraz w maszynie wytrzymałościowej w chwili zniszczenia
Fig. 3.4. CFRP strip before and after the test and in strength testing machine at failure

3.1.4. Zaprawa klejowa Sikadur®30

Taśmy węglowe przyklejano do belek specjalnym dwuskładnikowym klejem na bazie żywicy epoksydowej. Klej mieszano w proporcjach 3A:1B (wagowo), aż do uzyskania jasnoszarej barwy zaprawy. Badanie kleju Sikadur®30 na rozciąganie metodą rozłupywania i ściskanie wykonano na sześciu prostokątnych próbkach o wymiarach 40×40×160mm, w maszynie wytrzymałościowej FORM + TEST (PRÜFSYSTEM Typ 107/3000A).

Wyniki badania zaprawy klejowej rozciąganie przy zginaniu ($f_{ct,fl}$) i na ściskanie (f_c) zamieszczono w tablicy 3.4.

3.1.4. Sikadur®30 adhesive

Carbon fibre strips were bonded to beams using a special two-component adhesive on epoxy resin base. The adhesive was mixed in proportions 3A:1B till light grey colour was obtained. Tensile tests by splitting was carried out on six prismatic samples (40×40×160mm) of Sikadur®30 adhesive in the FORM+TEST (PRÜFSYSTEM Typ 107/3000A) testing machine.

The results of tensile tests in bending ($f_{ct,fl}$) and compressive test (f_c) of the adhesive mix are presented in Table 3.4.

Tablica 3.4. Charakterystyka wytrzymałościowa zaprawy klejowej Sikadur®30

Table 3.4. Strength properties of Sikadur® 30 adhesive

Nr próbki Sample No.	Wytrzymałość na rozciąganie Tensile strength $f_{ct,fl}$, [MPa]		Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength f_c , [MPa]		Wiek kleju Age of adhesive dni days
	wyniki results	średnie mean	wyniki results	średnie mean	
1	42.2	53.5	89.8	103.7	15
2	65.6		104.6		
3	50.2		103.3		
4	58.8		106.0		
5	51.6		107.9		
6	52.7		96.0		

W porównaniu z wytrzymałością na ściskanie kleju Sikadur®30 podaną przez producenta [2], $f_c > 100\text{MPa}$, wartości uzyskane w badaniu są zadawalające.

3.2. Belki

3.2.1. Zbrojenie i betonowanie belek

Kształt i zbrojenie belek żelbetonowych pokazano na rys. 3.5. Elementy zbrojone były prętami żebrowanymi $\varnothing 10$ i $\varnothing 12\text{mm}$ oraz strzemionami ze stali gładkiej $\varnothing 6\text{mm}$ i drutu D1 w rozstawie 100 i 200mm. W belce BF-04/0,5S przy podporach ułożono dodatkowo krótkie pręty zbrojenia dolnego, aby uniknąć odspojenia taśmy w tej strefie.

Belki betonowano w formie drewnianej. Beton przygotowywano w betoniarni wolnospadowej o pojemności 0.150m^3 , co pozwoliło na wykonanie jednej belki oraz próbek z dwóch zarobów. Mieszanke betonową zagęszczano w elemencie i próbkach wibratorem węgelnym firmy „Tremix” typ OM2.0 (buława ES50 o średnicy 50mm) z częstotliwością 200Hz. Elementy i próbki rozformowywano po 24 godzinach i przechowywano w hali wytrzymałościowej. Przez pierwsze trzy dni po betonowaniu belki i próbki polewano wodą. Taśmy Sika CarboDur przyklejano do belek najwcześniej po 8 dniach od daty betonowania elementu.

3.2.2. Technologia wzmocnienia belek

Belki wzmocniano przez doklejenie taśm węglowych do spodniej (taśma główna) i bocznych powierzchni belek. Sposób przyklejania taśm pokazano na rys. 3.6.

Przy wykonywaniu wzmocnienia stosowano się ściśle do zaleceń producenta podanych w [2].

Przygotowanie powierzchni

W celu uzyskania dobrej przyczepności kleju do betonu, przygotowano podłoże przez zeszlifowanie wierzchniej warstwy (mleczka cementowego) szlifierką kątową oraz młoteczkowanie.

Prace przygotowawcze zapewniły odspojenie wszystkich słabo związanych z podłożem cząstek betonu i kruszywa, dzięki czemu uzyskano wymaganą szorstkość powierzchni. Ostatnim zabiegiem przed przyklejeniem taśm było szczotkowanie szczotką drucianą i odkurzenie powierzchni belki za pomocą odkurzacza.

Przyklejenie taśm do belek

Dwuskładnikowy klej dostarczany jest w dwóch oddzielnych pojemnikach (w jednym żywica, w drugim utwardzacz). Przed połączeniem składników odważono potrzebne proporcje w stosunku 3(A):1(B) i mieszano w oddzielnym czystym pojemniku mieszarką wolnoobrotową (około 500 obrotów/min) w czasie 3 minut.

Po uzyskaniu jednolitej, jasnoszarej barwy zaprawy, przelano ją do drugiego czystego pojemnika w celu uniknięcia złego wymieszania składników (zwłaszcza na ściankach i dnie poprzedniego naczynia). Następnie na oczyszczonej powierzchni betonu nałożono szpachelką klej, wcierając go w miejscach ubytków podłoża.

Docięte na odpowiednią długość odcinki taśm układano na stole i dokładnie oczyszczano flanelową ściereczką nasączoną rozpuszczalnikiem Colma-Reiniger. Jeden koniec taśmy umieszczano w specjalnie przygotowanej

Results obtained in tests are satisfactory compared with compressive strength of Sikadur®30 adhesive given by the producer, $f_c > 100\text{MPa}$ [2].

3.2. Beams

3.2.1. Reinforcing and casting of the beams

The shape and reinforcement of reinforced concrete beams are shown in Fig. 3.5. The elements were reinforced by ribbed bars $\varnothing 10\text{mm}$ and $\varnothing 12\text{mm}$ and stirrups of smooth $\varnothing 6\text{mm}$ round steel and D1 wire, spaced at 100 and 200mm. At supports of beam BF-04/0, 5S additional short bars were placed at the bottom to avoid de-bonding of the strip in this region.

Beams were concreted in wooden forms. Concrete was mixed in a free-fall mixer of 0.150m^3 volume. This allowed to complete one beam and the relevant material samples from two batches. Concrete mix was compacted in the element and in samples using „Tremix” immersion vibrator, mode OM2.0 (with ES50 head of 50mm dia.) at 200Hz frequency. The forms were struck after 24 hrs and stored in the laboratory. During the first three days after casting, the elements and samples were sprinkled with water. Sika CarboDur strips were bonded to the elements not earlier than 8 days after casting.

3.2.2. Strengthening technique of the beams

The beams were strengthened by bonding CFRP strips to the underside (main strip) and both sides of the beams. The way of strengthening beams is shown in Fig. 3.6.

When carrying out the strengthening, the prescriptions of the producer [2] were strictly adhered to.

Preparation of the substrate

In order to obtain good adhesion of the adhesive to concrete, the surface was prepared by grinding off the surface layer (cement wash) using angle grinder and by hammering.

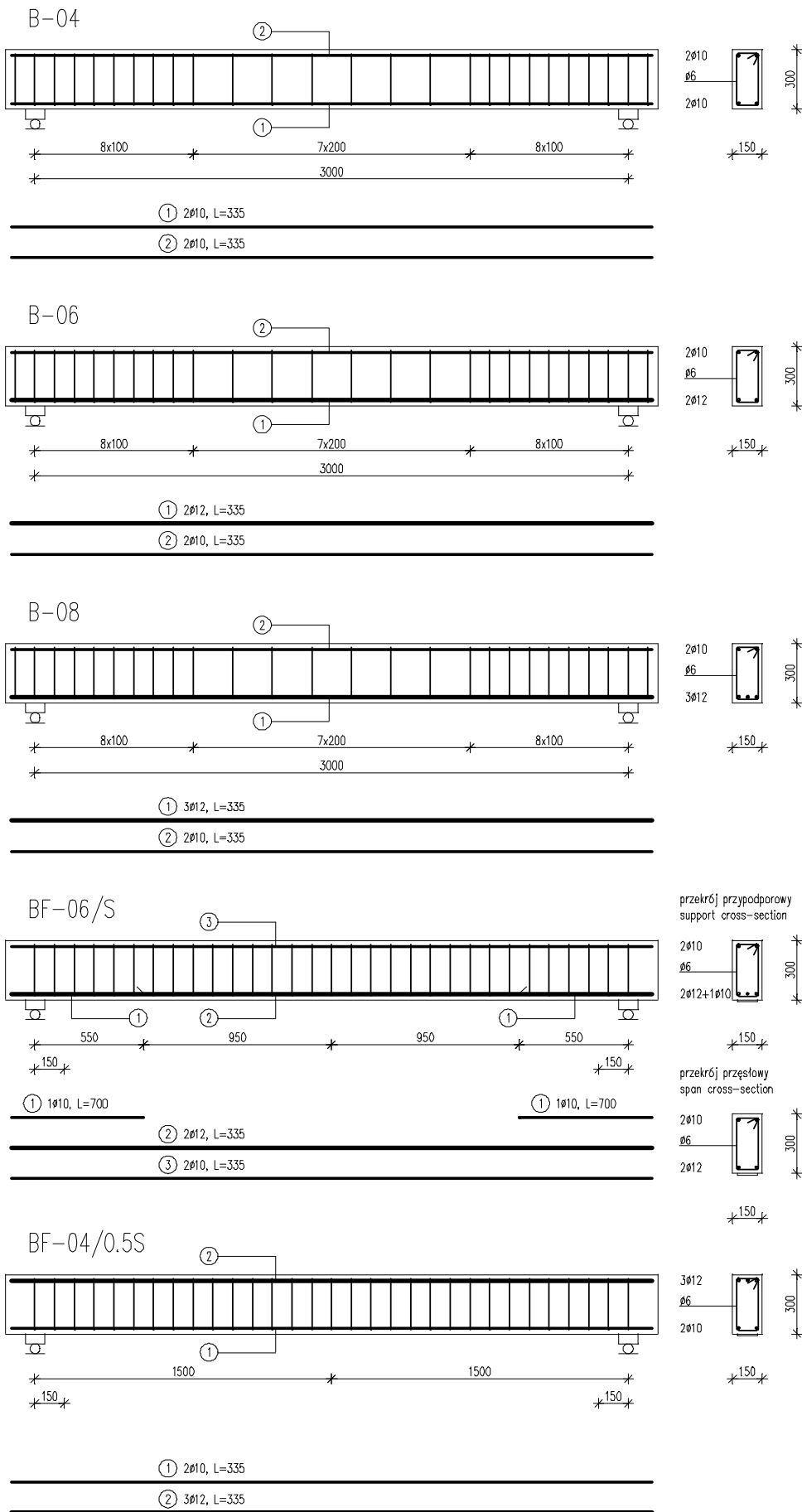
The preparatory work assured the removal of all concrete and gravel particles loosely connected with the substrate and the required roughness of the surface. The last treatments before bonding of the strips were brushing using wire brushes and vacuum cleaning.

Bonding the strips to the beams

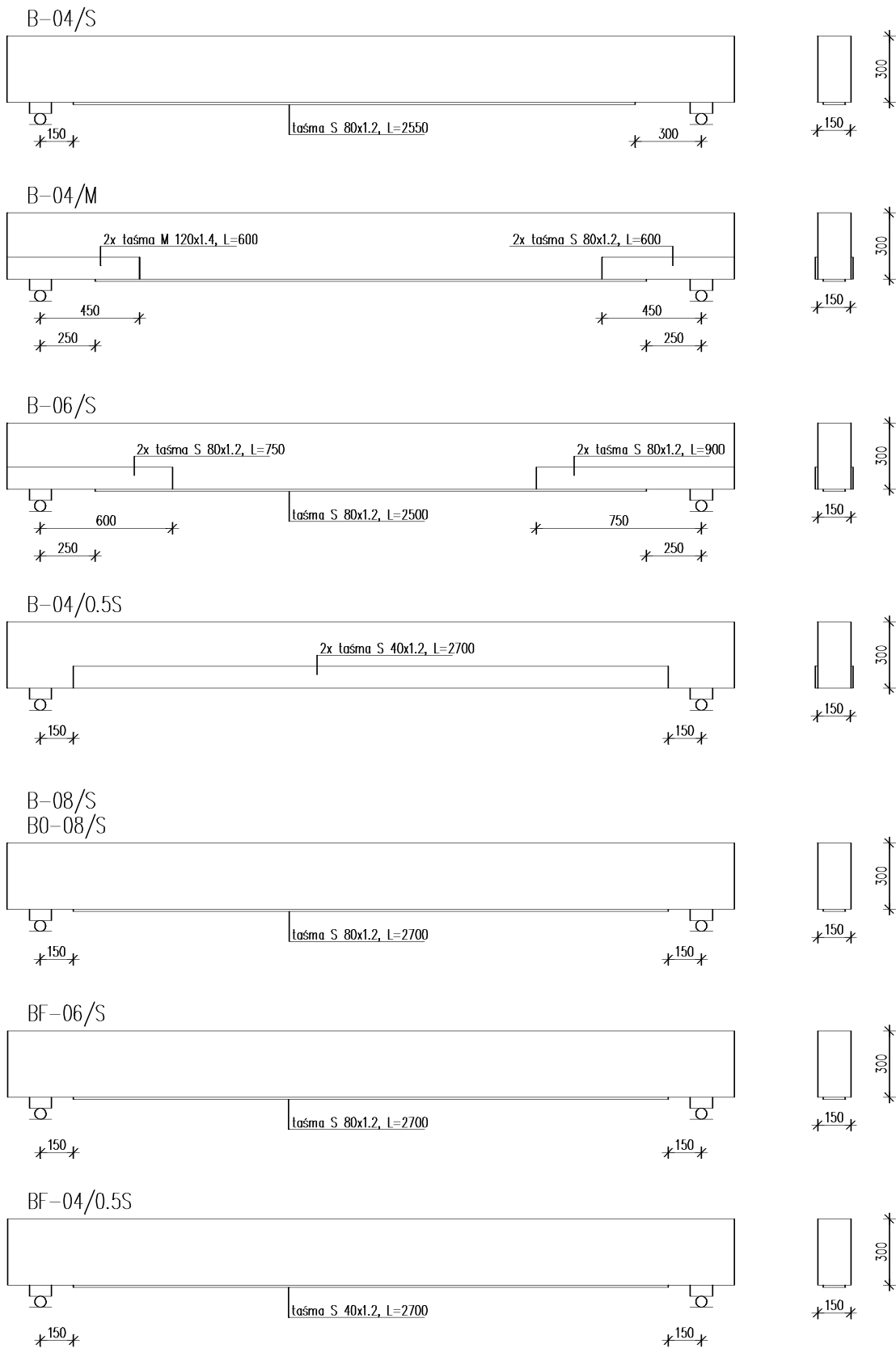
Two-component adhesive is supplied in two separate containers (one containing the resin and the other -the hardener). Before mixing, the components were weighed in proportion 3 (A) to 1 (B) and placed in a separate container. Mixing was carried out using slow-speed (abt. 500r.p.m.) mixer for 3 min.

Having obtained uniform, light-grey mix, it was poured to the second, clean container to avoid poor mixing of components (particularly on walls and bottom of the previous container). Subsequently, adhesive was put on the cleaned concrete surface using a spatula, rubbing it in places of loss of concrete base.

Strip segments cut to suitable lengths have been put on the table and cleaned accurately using flannel rag, soaked in Colma-Reiniger solvent. One ending of the strip was placed in special guide, forming adhesive surface on the strip in triangular shape. Thickness of adhesive was 2.5mm in the highest point of the adhesive surface.



Rys. 3.5. Sposób zbrojenia belek
 Fig. 3.5. Reinforcement of the beams



Rys. 3.6. Sposób wzmocnienia belek taśmami CFRP

Fig. 3.6. Arrangement of the CFRP strips used for beam strengthening (taśma = strip)

przewodnicy, kształtującej na taśmie “daszek” z kleju podczas przeciągania taśmy. Grubość zaprawy klejowej po nałożeniu wynosiła 2.5mm w najwyższym punkcie “daszka”.

Po przyłożeniu taśmy na zagruntowaną wcześniej powierzchnię belki, dociskano ją za pomocą wałka z twardej gumy. Nadmiar kleju wyciśnięty po obu stronach taśmy usuwano szpachelką. Na zakończenie całą przyklejaną taśmę przemywano rozpuszczalnikiem Colma-Reiniger.

Taka sama kolejność prac obowiązywała przy naklejaniu taśm na bocznych powierzchniach belek. Wszystkie belki po wzmocnieniu przechowywano w hali wytrzymałościowej przez co najmniej 20 dni do dnia badania.

3.3. Stanowisko badawcze

Belki obu serii badano w jednym stanowisku, którego ogólny widok pokazano na rys.3.7 i 3.8.

Stanowisko badawcze zbudowane było z następujących elementów:

- konstrukcja ramowa z blachownic stalowych,
- siłownik zamocowany do górnej części ramy,
- urządzenie zasilające siłownik,
- stanowisko pomiarów komputerowych.

After putting the strip on the previously grounded beam surface it was pressed down by means of a hard rubber roller. Excess of adhesive extruding at both sides of the strip was removed using a spatula. Finally, the strip bonded to the beam was cleaned using the Colma-Reiniger solvent.

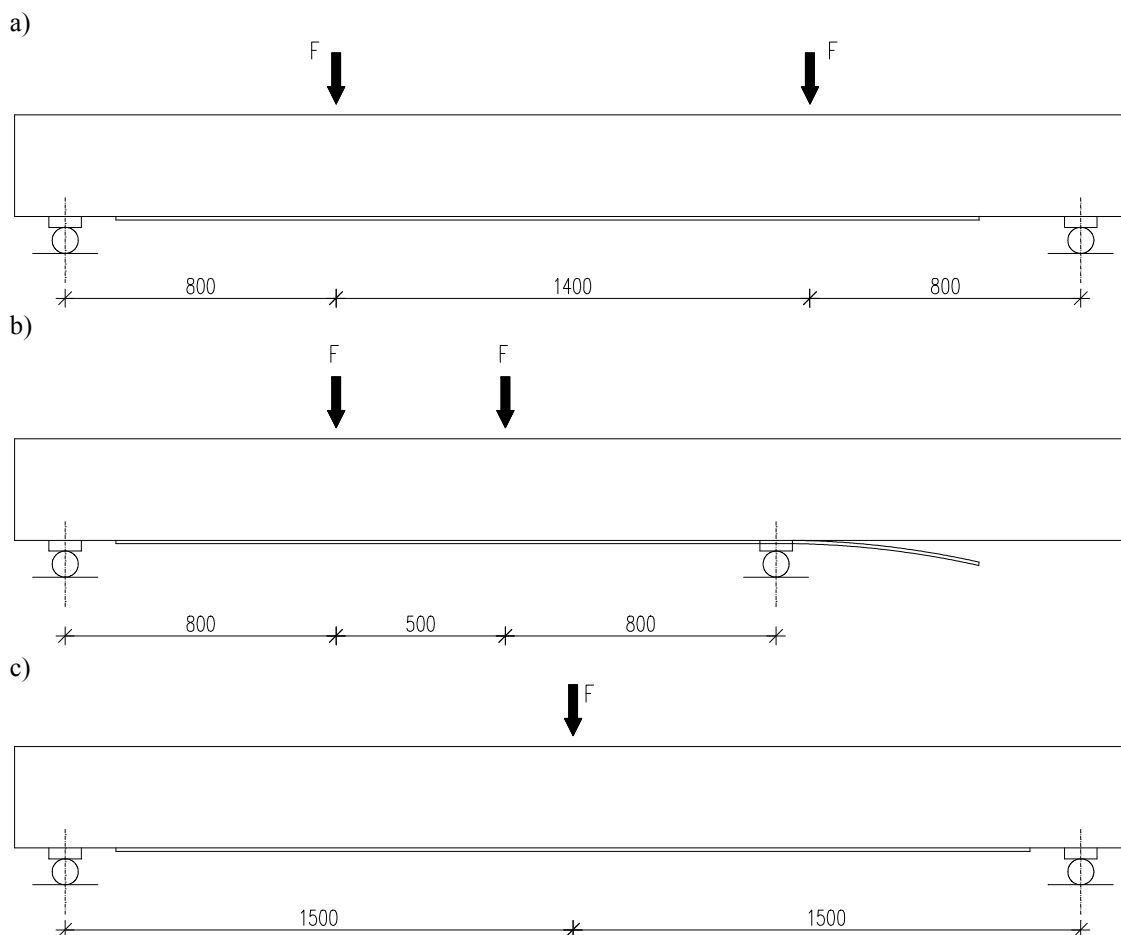
The same sequence of work was carried out during bonding of strips on both sides of the beams. All reinforced beams were stored in testing hall for at least 20 days till the day of testing.

3.3. Test stand

Both series of beams (I and II) were tested on one stand; its overall view is shown in Figs. 3.7 and 3.8.

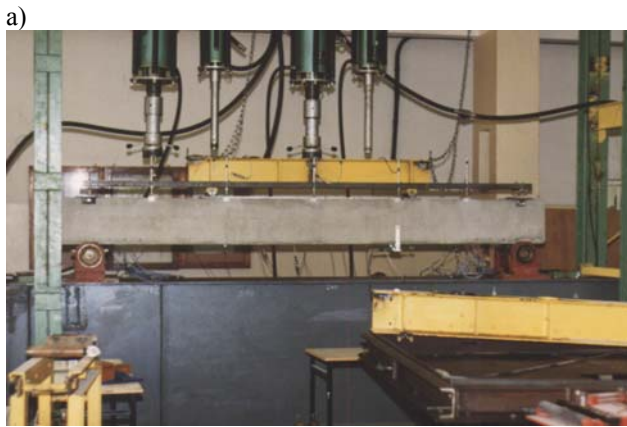
Test stand was composed of following elements:

- test frame of steel strip girders,
- hydraulic jack attached to upper part of the frame,
- device supplying the servo-motor,
- computer measurements statement.



Rys. 3.7. Stanowisko badawcze belek serii podstawowej - I (a), podstawowej po zmianie podpory (b), uzupełniającej - II (c)

Fig. 3.7. Test stand for: a) basic I series of beams, b) basic series after the change in location of the support, c) supplementary II series



Rys. 3.8. Ogólny widok stanowiska badawczego w obu seriach belek: a) seria podstawowa - I, b) seria uzupełniająca - II
 Fig. 3.8. Overall view of test stand in both series of beams: a) basic I series, b) supplementary II series

Belki serii I obciążano za pośrednictwem stalowego trawersu, uzyskując obciążenie w postaci dwóch sił skupionych, a w belkach serii II siła obciążająca element była przekazywana wprost za pomocą siłownika hydraulicznego. Stosowano siłownik o zakresie 400kN. Badane elementy umieszczano na dolnej, poziomej części ramy i podpierano przegubowo w dwóch punktach o osiowym rozstawie 3000mm. W belkach z niesymetrycznie przyklejonymi taśmami, po zniszczeniu w obszarze jednej z podpór, zmniejszano rozpiętość do 2100mm przesuując podporę, przy której wystąpiło zniszczenie, w kierunku drugiej. Aby zachować taką samą odległość sił obciążających od osi podpór zmieniano trawers na krótszy, uzyskując rozstaw sił obciążenia 500mm.

Dalsze obciążenie belki było możliwe dzięki temu, że zniszczony jej fragment pozostawał poza osią podpory i nie miał wpływu na pracę elementu. Obciążanie kontynuowano aż do ponownego zniszczenia belki.

3.4. Pomiary

W trakcie badania mierzono przemieszczenia pionowe i odkształcenia na powierzchni belki. Pomiar odkształceń betonu w poziomie ściskanej krawędzi belki wykonano za pomocą czterech przetworników przemieszczeń liniowych na bazach 300mm.

Odkształcenia w poziomie zbrojenia rozciąganego mierzono na długości odcinka czystego zginania czterema przetwornikami przemieszczeń liniowych o bazach 300mm.

Pomiar ugięć belki wykonywano wykorzystując przetworniki przemieszczeń liniowych, przytwierdzone do listwy wykonanej z kształtowników stalowych, opartej przegubowo na belce w osi jednej z podpór i przegubowo przesuwnie w osi drugiej podpory.

Odkształcenia betonu w przypodporowych strefach belek oraz odkształcenia taśm dolnych i bocznych mierzono za pomocą tensometrów elektrooporowych o bazach 20 i 50mm.

Odczyty wszystkich rodzajów czujników rejestrowano automatycznie przy każdym poziomie obciążenia 20 razy co 1.5 sekundy. Do sterowania pomiarami i zapisu odczytów stosowano uniwersalny miernik współpracujący z komputerem IBM PC według programu PC-LAB.

For the beams of the I series loading of two point loads was gained by using a kind of steel cross-beam. In the II series beams load was applied directly by hydraulic press. The jack of 400kN capacity was used. Tested elements were placed in the lower, horizontal part of the frame and supported on two hinged supports spaced at 3000mm. In beams with unsymmetrical bonded strips after failure in the region of one support, the span was reduced to 2100mm by shifting the support where the failure appeared in the direction of other support. In order to keep equal distances of loads from support axes, the steel cross-beam was changed to a shorter one, obtaining the spacing between loads equal 500mm.

Further loading of the beam was possible because the failed part remained beyond support axis and had no influence on the behaviour of element. Loading was continued till the final destruction of the beam.

3.4. Measurements

During the tests, vertical displacements and strains on beam surface were measured. Measurement of concrete strains at the level of compressive edge of the beam was carried out using four linear displacement transducers on 300mm bases.

Strains in the tensioned layer were measured in pure bending region by means of four linear displacement transducers on 300mm bases.

Measurements of beam deflections were carried out by means of linear displacement transducers attached to a steel flat bar made, supported on hinged bearing at one end and hinged with sliding joint at the other.

Strains in concrete at support zones of beams and strains of bottom and side strips were measured using electric resistance gauges on 20 and 50mm bases.

Readings of gauges of all kinds were recorded automatically at each loading step 20 times per 1.5 seconds. Universal analyser connected with an IM PC computer running the PC-LAB program carried out measurement control.

Rozmieszczenie czujników dla każdej belki przedstawiono na rys. 3.9.

W trakcie trwania badania rejestrowano układ rys na powierzchni belek oznaczając obok rys poziom obciążenia, przy którym powstały.

Belki obciążano siłami zwiększonymi skokowo aż do zniszczenia. Przy jednym z poziomów obciążeń wykonywano pięciokrotny proces odciążenia – obciążenia. Wielkość siły ustalano na podstawie wskazań urządzenia zasilającego obciążnik hydrauliczny oraz dodatkowo kontrolowano za pomocą czujnika ciśnieniowego, wmontowanego w układ hydrauliczny i współpracującego z miernikiem.

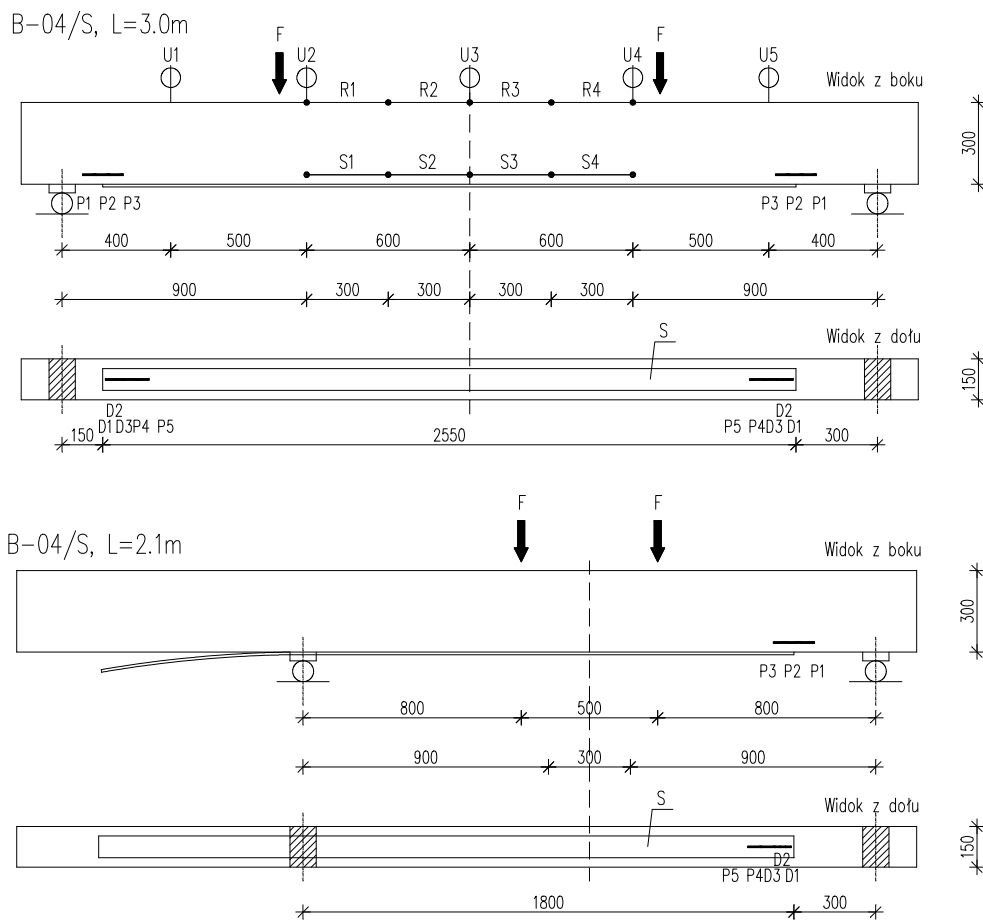
W przypadku jednej belki (B0-08/S), taśmę przyklejono pod obciążeniem o wartości $2F=55\text{kN}$. Po uzyskaniu przez klej pełnej wytrzymałości, belkę odciążono i ponownie obciążono aż do zniszczenia w sposób opisany wcześniej. W Załączniku zamieszczono wyniki pomiarów wstępnych obciążanej belki, przed przyklejeniem taśmy.

Location of measuring sensors on each of beams is shown in Fig. 3.9.

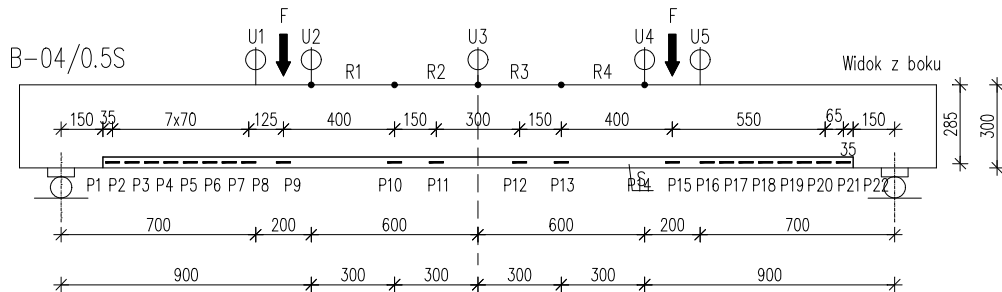
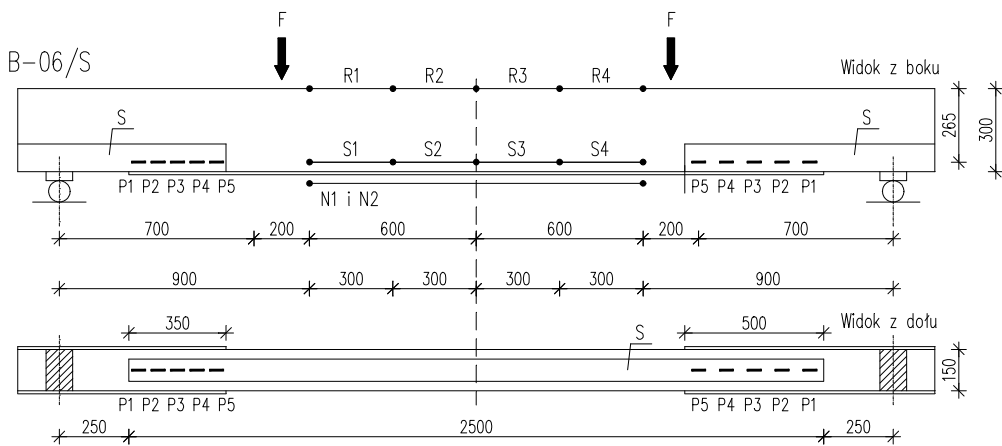
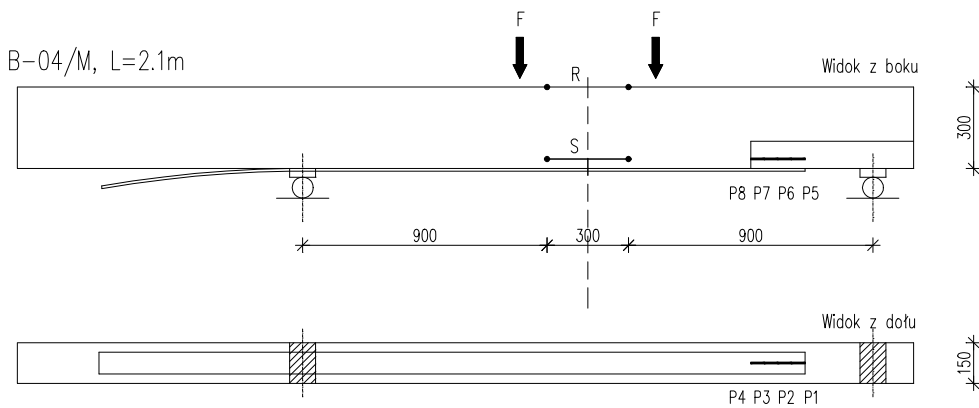
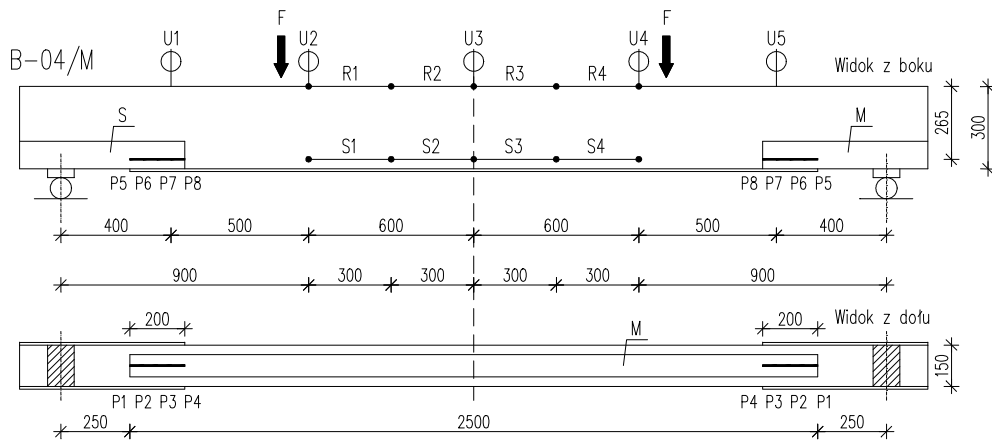
During test the map of cracks on the surface of beams was recorded, with notes - next to cracks - on load level at their formation.

Loads increased by steps till failure. At one of the loading levels, five loading - unloading cycles were carried out. The value of force was established on the basis of indications of the device feeding hydraulic press; it was controlled additionally by pressure sensor, introduced into hydraulic system and connected to the measuring instrument.

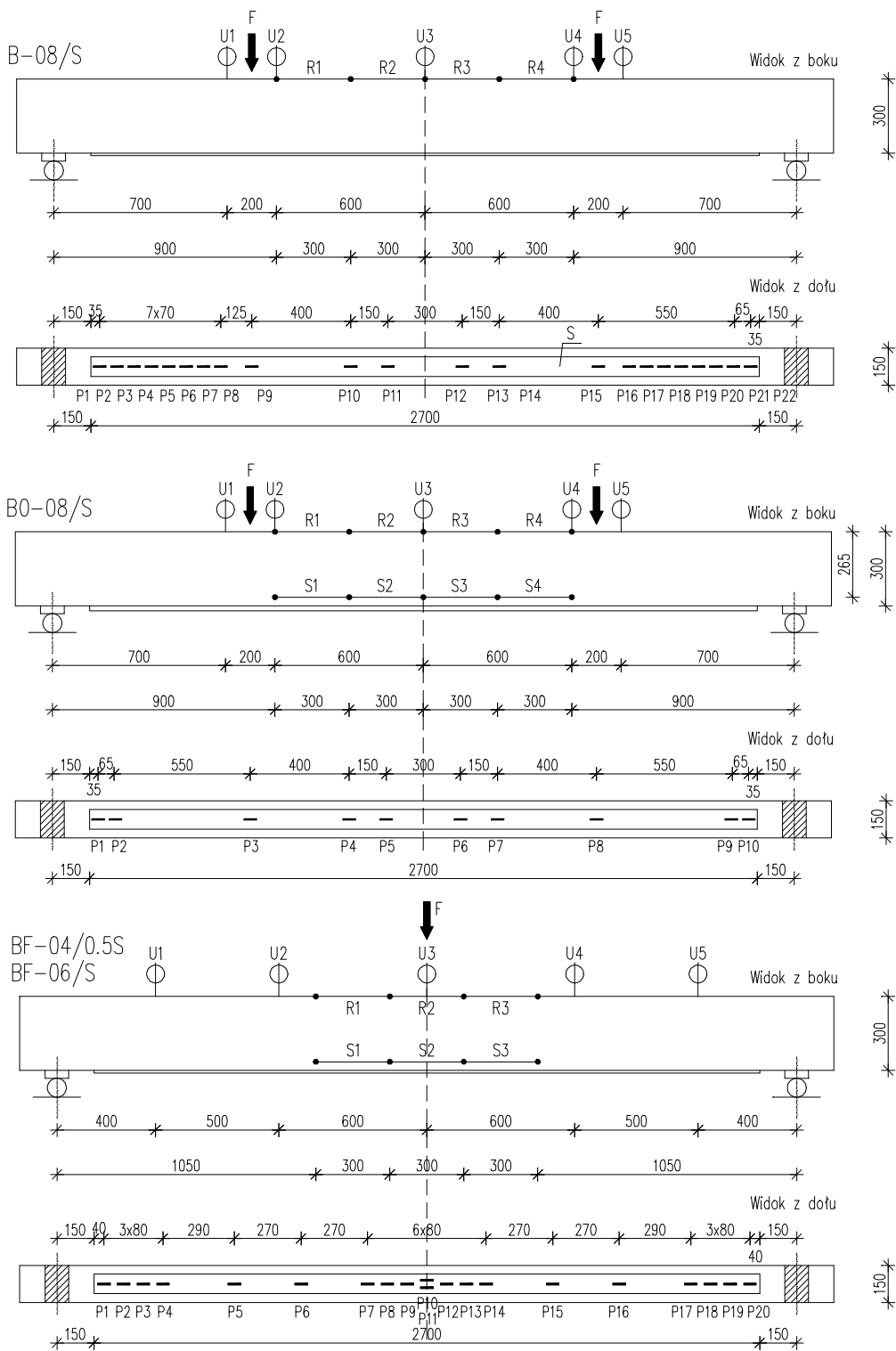
In the case of one beam (B0-08/S) the strip was bonded to the beam under load $2F=55\text{kN}$. After reaching full strength by the adhesive, the beam was unloaded and then loaded again till failure in manner mentioned before. Initial results of measurements of the beam loaded before strengthening are given in the Appendix.



Rys. 3.9. Rozmieszczenie czujników pomiarowych w belkach
Fig. 3.9. Location of measuring gauges on beams



Rys. 3.9. cd. Rozmieszczenie czujników pomiarowych w belkach
 Fig. 3.9. cont. Location of measuring gauges on beams



Rys. 3.9. cd. Rozmieszczenie czujników pomiarowych w belkach
 Fig. 3.9. cont. Location of measuring gauges on beams

4. WYNIKI BADAŃ

Wyniki pomiarów rejestrowane w trakcie badania belek przetworzono za pomocą specjalnego programu komputerowego, dzięki któremu określono:

- lokalne przemieszczenia pionowe belki (v),
- odkształcenia betonu strefy ściskanej (ϵ_c) i rozciąganej w poziomie zbrojenia (ϵ_t),
- odkształcenia taśmy dolnej i taśm bocznych,
- krzywiznę (κ) - na podstawie uśrednionych odkształceń ściskanej i rozciąganej strefy przekroju, pomierzonych na bazach umieszczonych na odcinku czystego zginania, ze wzoru (5.1):

$$\kappa = \frac{\epsilon_t - \epsilon_c}{h'} * 10^{-3} \text{ [1/m]} \quad (4.1)$$

gdzie:

- ϵ_t - średnie odkształcenie strefy rozciąganej, ze znakiem dodatnim, ‰,
- ϵ_c - średnie odkształcenie strefy ściskanej, ze znakiem ujemnym, ‰,
- h' - odległość między włóknami przekroju, dla których pomierzono odkształcenia, m.

W belkach serii I rozstaw sił obciążających wynosił 1400mm, zatem odkształcenia przyjmowano jako średnie z 4 baz pomiarowych o długości 300mm każda, z odcinka 1.20m. W obu belkach serii II również określono odkształcenia strefy ściskanej i rozciąganej, ale pominięto obliczenie krzywizny, gdyż uśrednienie nie było uzasadnione ze względu na obciążenie jedną siłą skupioną.

W przypadku belki B-08/S rejestrację pomiarów rozpoczęto od obciążenia $2F=20\text{kN}$ (przypadkowy błąd zapisu), dlatego wszystkie pomiary przy tym obciążeniu mają wartość zero.

Dla każdego poziomu obciążenia omawiane wielkości podano jako określone na podstawie:

- pomiaru pierwszego (p),
- ostatniego (o),
- średniego z rejestrowanych (s).

Wszystkie wyniki pomiarów są dostępne na CD-ROM w KBB w postaci wykresów i tabel. W załączniku zamieszczono wyniki badań tylko dla belki B-08/S.

4.1. Mechanizmy zniszczenia belek

Wszystkie belki zniszczyły się przez odspojenie taśmy CFRP. Siły przy których to nastąpiło nazwane dalej niszczącymi, podano w tablicy 4.1. Dla belek wzmocnionych niesymetrycznie (B-04/S, B-04/M i B-06/S) podano dwie wartości sił, odpowiadające zniszczeniu przy każdej z podpór.

Zniszczenie zawsze przebiegało gwałtownie, choć w różny sposób. W belkach I serii wyraźnie ujawniły się dwa mechanizmy zniszczenia, różniące się miejscem występowania i obrazem odspojenia taśmy. Pierwszy z nich (model "P"), miał miejsce w strefie przypodporowej belek, w pobliżu końca taśmy wzmacniającej (rys. 4.1÷4.2). Taśma odspajała się na krótkim odcinku obejmującym strefę przypodporową, nie osiągając punktu przyłożenia siły obciążającej belkę. Towarzyszył temu gwałtowny przyrost szerokości rozwarcia ukośnej rysy w pobliżu końca taśmy i postępująca utrata przyczepności

4. TEST RESULTS

The results recorded during tests on the beams were processed by means of the special computer program. Using it the following were determined:

- local vertical displacements of the beam (v),
- strains in compression zone of concrete (ϵ_c) and in tensile zone at the level of reinforcement (ϵ_t),
- strains in bottom and in side strips,
- curvature (κ) on the basis of averaged strains in compressed and tension zone of the cross-section, measured on bases placed in the pure bending segment, from the formula (5.1):

$$\kappa = \frac{\epsilon_t - \epsilon_c}{h'} * 10^{-3} \text{ [1/m]} \quad (4.1)$$

where:

- ϵ_t - average strain in tension zone, with positive sign, ‰
- ϵ_c - average strain in compression zone, with negative sign, ‰
- h' - distance between levels of cross-section where strains were measured, m.

In I series beams the spacing of loads was 1400mm, the strains were therefore assumed as average of 4 measuring bases of 300mm length each, from the segment of 1.20m. In both beams of II series, the strains in compression and tension zones were determined, but calculation of curvature was omitted, as averaging was not justified because of loading by a single concentrated force.

In case of B-08/S beam, load recording began from the load $2F=20\text{kN}$ (accidental record error) - and therefore all measurements at this load have zero values.

For every loading level the magnitudes mentioned above were given as determined on the basis of:

- first measurement (p),
- last measurement (o),
- average measurement (s).

All measurement results presented in form of diagrams and tables are available on CD-ROM in KBB. Numerical results with diagrams given only for the beam B-08/S - are presented in Appendix.

4.1. Failure modes of beams

All beams failed by de-bonding of CFRP strip. Loads at which failure occurred, called ultimate loads are given in Table 4.1. For beams reinforced unsymmetrical (B-04/S, B-04/M and B-06/S) two values of ultimate loads in failure of each support are given.

The failure always occurred suddenly, but in various ways. In I series of beams two failure modes were visible, differing by position and image of the strip de-bonding.

First of them (P model) took place in the support zone of beams, near the end of CFRP strip (Figs. 4.1 to 4.2). The strip lost bond over a short distance including the support zone, but not reaching the load point. This was accompanied by sudden increase of inclined crack width near the end of the strip and progressive loss of bond between concrete and steel reinforcement in vicinity of this crack. De-bonding plane ran along the reinforcement and concrete cover remained well bonded to the strip that

betonu do zbrojenia w sąsiedztwie tej rysy. Płaszczyzna odspojenia przebiegała wzdłuż zbrojenia, a betonowa otulina pozostawała dobrze zespolona z taśmą, co powodowało tworzenie się charakterystycznego „jęzora”.

Ten mechanizm zniszczenia powtarzał się również przy przeciwległej podporze, w trakcie obciążania belki ze zmniejszoną rozpiętością.

caused the formation of a characteristic "tongue".

This mechanism of failure was also repeated for the other support in the beam with decreased span.

Tablica 4.1. Zestawienie sił niszczących; seria I - podstawowa, seria II - uzupełniająca

Table 4.1. Failure forces; I series - basic, II series - supplementary

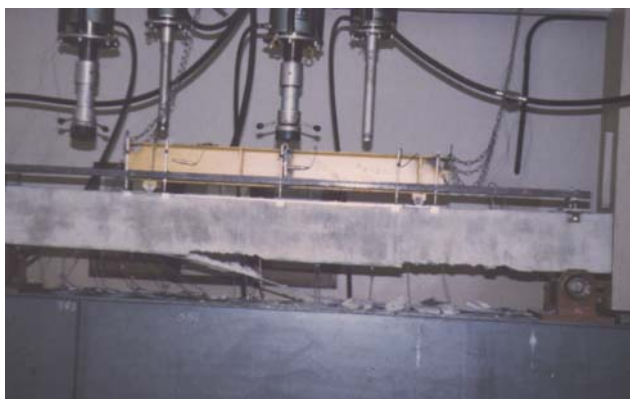
Seria Series	Belki Beam symbols	Obciążenie niszczące, kN Ultimate loads, kN		Model zniszczenia Mode of failure	ϵ_p ‰	$\epsilon_p / \epsilon_{pu}$
I	B-04/S	2F	120	P	2.5	0.15
			90	P		
	B-04/M		120	P	2.68	0.22
			120	P		
	B-06/S		140	P	3.43	0.20
			145	P		
	B-08/S		180	Z	5.0	0.29
BO-08/S	180	Z	5.5	0.32		
B-04/0.5S	98	Z	5.0	0.29		
II	BF-04/0.5S	F	48	Z	5.8	0.34
	BF-06/S		85.5	Z	5.4	0.32



Rys. 4.1. Postęp zniszczenia belki B-04/S
Fig. 4.1. The mode of failure of the beam B-04/S



Rys. 4.2. Postęp zniszczenia belki B-04/M
Fig. 4.2. The mode of failure of the beam B-04/M



Rys. 4.3. Postęp zniszczenia belki B-08/S
Fig. 4.3. The mode of failure of the beam B-08/S



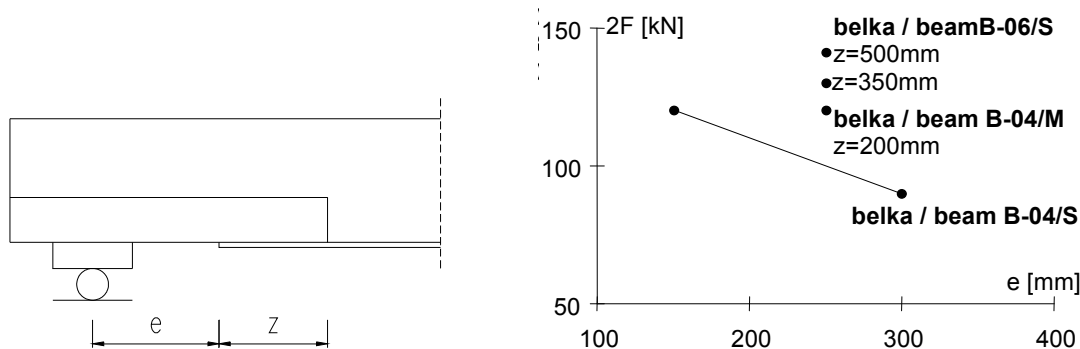
Rys. 4.4. Postęp zniszczenia belki BF-06/S
Fig. 4.4. The mode of failure of the beam BF-06/S

Wcześniej analogiczny mechanizm zniszczenia obserwowano w żelbetowych belkach ze skracanym zbrojeniem podłużnym [3]. Do zniszczenia dochodziło wówczas w przekrojach przez końce skróconych prętów, a utrata przyczepności była spektakularna - końce prętów wręcz przesuwali się (wrywały z betonu) wzdłuż belki, czemu towarzyszyły odgłosy niszczenia betonu. Nie dochodziło oczywiście do pionowych przemieszczeń końcówek prętów, gdyż skracane pręty znajdowały się wewnątrz szkieletu zbrojeniowego.

Przy drugiej postaci zniszczenia (model "Z") taśma odspajała się na znacznie dłuższym odcinku, obejmującym nie tylko strefę przypodporową lecz także obszar czystego zginania. W ten sposób zniszczyły się belki serii I: B-04/0.5S, B-08/S i B0-08/S (rys. 4.3). Obserwatorom wydawało się, że odspojenie taśmy rozpoczynało się na odcinku między siłami i postępowało w kierunku jednej z podpór. Przebiegało to jednak tak szybko, że nawet zapis video nie dostarczył obiektywnych informacji to potwierdzających. Powierzchnia odspojenia przebiegała w zasadzie w warstwie kleju i tylko częściowo wzdłuż powierzchni zbrojenia zwykłego (rys. 4.3).

Wyjaśnienie, co jest powodem odspojenia taśmy w obszarze zginania stało się możliwe dopiero po badaniu belek obciążonych jedną siłą skupioną (BF-06/S, BF-04/0.5S). Proces odspajania taśmy trwał tu na tyle długo (kilkanaście sekund), że możliwe stały się obserwacje wizualne. Jednoznacznie stwierdzono, że odspojenie zaczęło się w obszarze maksymalnego momentu w sąsiedztwie pionowej rysy i postępowało w kierunku jednej z podpór (rys. 4.4). Tę obserwację potwierdził zapis na taśmie video.

Z porównania sił niszczących tych belek, które zniszczyły się w strefie przypodporowej (tablica 4.1.) wynika, że odległość końców taśm od podpór ma wpływ na nośność wzmocnionego elementu żelbetowego. Nośność okazała się tym większa, im bliżej podpory była doprowadzona taśma. Można też zauważyć, że zastosowanie dodatkowych taśm przyklejanych na bocznych powierzchniach belki, w strefach przypodporowych, poprawiało warunki zakotwienia taśmy dolnej. Zwiększenie długości zakładu taśmy bocznej z taśmą główną powodowało wzrost nośności belki (porównaj rys. 4.5 i tabl. 4.1). Efekt ten był jednakże ograniczony, bowiem na przykładzie belki B-06/S widać, że przy $z=350\text{mm}$ otrzymano $2F=140\text{kN}$, a gdy $z=500\text{mm}$ nośność niewiele wzrosła i wynosiła $2F=145\text{kN}$.



Rys. 4.5. Wpływ długości zakładu taśmy bocznej z taśmą dolną na nośność belek

Fig. 4.5. Influence of the side strip overlap with the main strip on the load-carrying capacity of the beams

Analogous mechanism of failure was observed earlier in reinforced concrete beams with curtailed longitudinal reinforcement [3]. Failure in this case occurred in cross-sections through the ends of curtailed bars and loss of bond was catastrophic: bar ends were torn from concrete along the beam, with audible sounds of concrete destruction. Vertical displacement of bar ends did not, of course, occur because they were placed inside concrete beam.

In second mode of failure, (Z-model) the strip de-bonded over a much longer distance, including not only support zone, but also the pure bending area. In this way failed I series beams: B-04/0.5S, B-08/S and BO-08/S (Fig. 4.3.). De-bonding of the strip seemed to start in the distance between two loads and progressed in direction of one of the supports. However failure occurred so quickly that even video recording didn't confirm that mechanism. The de-bonded surface ran principally in layer of adhesive and only partly along the surface of steel reinforcement (Fig. 4.3).

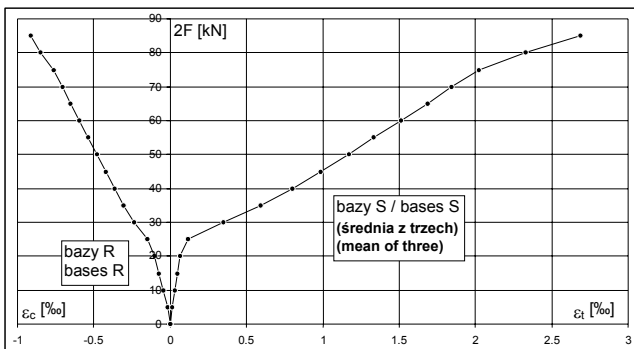
The explanation of the reason of strip de-bonding in segment of pure bending became possible only after investigation on beams loaded by one concentrated force skupioną (BF-06/S, BF-04/0.5S). The process of de-bonding lasted here so long (between 10 and 20 seconds) that visual observation was possible. It was unequivocally established that de-bonding started in zone of maximum bending moment, next to a vertical crack, and progressed in the direction of one of the supports (Fig. 4.4). This observation was confirmed by video strip recording.

From the comparison of ultimate loads for the beams that destroyed in the support region (Table 4.1) follows that the distance of the strip ends from the supports has an influence on bearing capacity of the strengthened reinforced concrete element. Capacity was greater when the strip end was nearer to the support. It can be also noted, that application of additional strips bonded to both sides of the beams at the support regions improved the condition of anchorage of the bottom strip. The increase of overlap of side strip with the main strip raised the capacity of the beam (cf. Fig. 4.5 and Table 4.1). The result was, however, limited - on the example of B-06/S beam can be seen that at $z=350\text{mm}$ load $2F=140\text{kN}$ was reached, while with $z=500\text{mm}$ this load was little increased - to $2F=145\text{kN}$ only.

4.2. Odształcenia i krzywizny

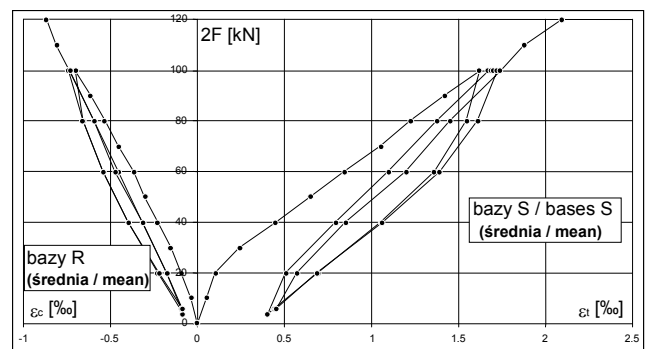
Z pomiarów odkształceń belek wynika, że jeżeli do odspojenia taśmy dochodziło w strefie przypodporowej, to odkształcenia mierzone na odcinku czystego zginania w poziomie zbrojenia zwykłego sięgały 2.6‰ - w belce bez dodatkowych bocznych taśm (B-04/S) i 3.4‰ - w belce B-06/S z takimi taśmami. W chwili zniszczenia odkształcenia skrajnego włókna strefy ściskanej nie przekroczyły 2‰, a więc były dużo mniejsze od granicznych przy ścisaniu. Oznacza to, że przy zniszczeniu belek przez odspojenie taśmy w strefie przypodporowej, nośność przekroju w strefie zginania pozostawała dalece niewykorzystana.

Na rys. 4.6-4.8 zamieszczono wykresy zależności $2F-\varepsilon$ (na odcinku czystego zginania) tych belek, które zniszczyły się w powyższy sposób (model „P”). Odkształcenie ε_c jest średnim odkształceniem pomierzonym w skrajnym ściskanym włóknie betonu, a ε_t - średnim odkształceniem pomierzonym na powierzchni betonu we włóknie oddalonym o 35 mm od dolnej krawędzi przekroju. Pierwsze załamanie linii wykresów świadczy o zarysowaniu przekroju, a drugie o uplastycznieniu zbrojenia rozciąganego. Taki sam charakter mają wykresy obciążenie - krzywizna, zamieszczone w Załączniku.



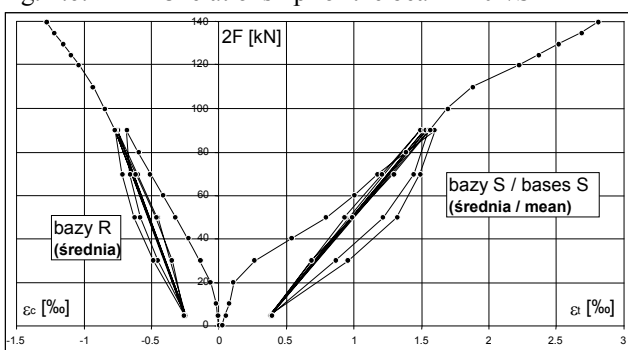
Rys. 4.6. Zależność $2F-\varepsilon$ dla belki B-04/S

Fig. 4.6. $2F-\varepsilon$ relationship for the beam B-04/S



Rys. 4.7. Zależność $2F-\varepsilon$ dla belki B-04/M

Fig. 4.7. $2F-\varepsilon$ relationship for the beam B-04/M



Rys. 4.8. Zależność $2F-\varepsilon$ dla belki B-06/S

Fig. 4.8. $2F-\varepsilon$ relationship for the beam B-06/S

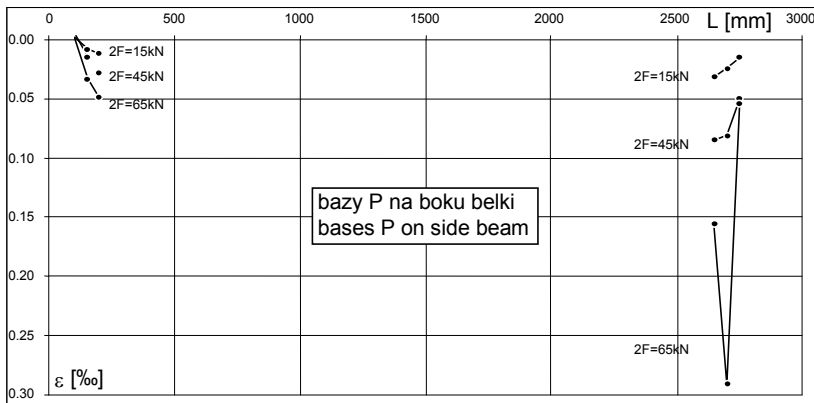
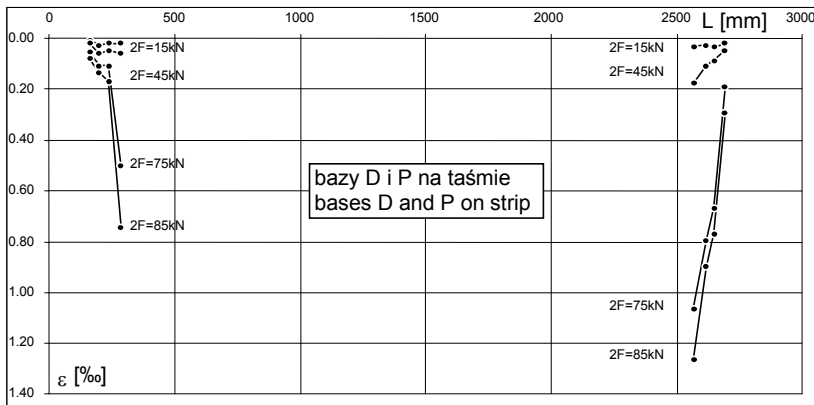
Odształcenia taśmy przy jej końcach narastały w kierunku środka belki i były oczywiście wyraźnie mniejsze niż w obszarze maksymalnego zginania. Przykładowy wykres odkształceń końców taśm przy kilku poziomach obciążenia, dla belek B-04/S i B-06/S, przedstawiono na rysunkach odpowiednio 4.9 i 4.10.

4.2. Strains and curvatures

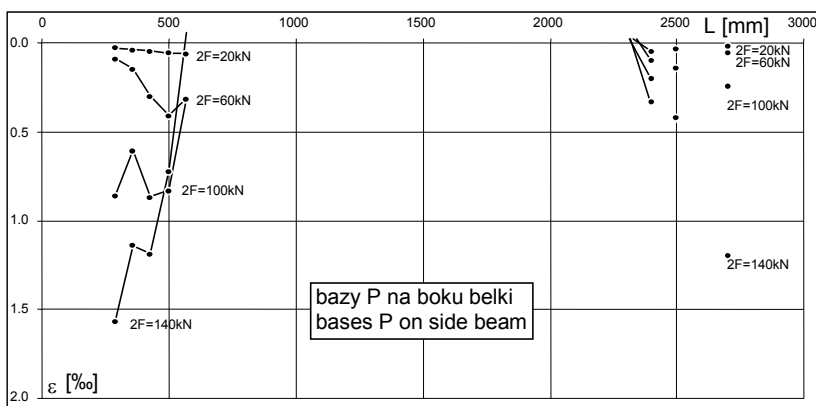
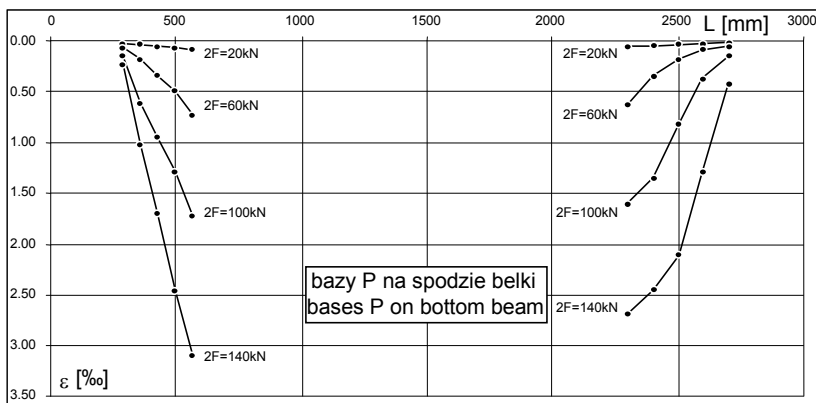
From the measurements of strains follows that - if de-bonding of strip appeared in the support region, strain measured in the pure bending segment at steel reinforcement level - reached 2.6‰ - in beams without additional side strips (B-04/S) and 3.4‰ - in beam with such strips (B-06/S). At failure, the strains of compressive edge of the beam did not exceed 2‰, therefore they were much lower than ultimate strains of concrete (3.5‰). This means that at failure by de-bonding of the strip in the support region, de-bonding of strip in support zone far from exhausted the capacity of cross-section in the bending zone.

Diagrams of relationship $2F-\varepsilon$ (in the segment of pure bending) are shown in Figs 4.6 to 4.8. They concern beams that failed in this mode (model „P”). Strain ε_c is the mean strain measured in the extreme compressed fibre, and ε_t - mean strain in concrete in level situated 35mm above the bottom surface of the cross-section. First change of angle in the graph is a proof of cross-section cracking, second change - a proof of yielding of reinforcement. Load - strain graphs shown in the Appendix have the same character.

Strains at the ends of the strip increased in the direction to the beam mid-span and were clearly less than in the region of maximum bending. Example diagram of strains in strip ends, at several load levels is shown for beams B-04/S and B-06/S in Figs. 4.9 and 4.10.



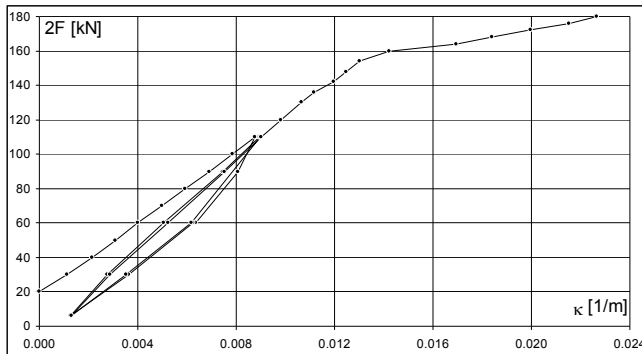
Rys. 4.9. Odkształcenia taśmy w belce B-04/S: a) odkształcenia taśmy dolnej, b) odkształcenia taśm bocznych
 Fig. 4.9. Strip strains in beam B-04/S: a) strain measurements on bottom strip, b) strain measurements on side strips



Rys. 4.10. Odkształcenia taśmy w belce B-06/S: a) odkształcenia taśmy dolnej, b) odkształcenia taśm bocznych
 Fig. 4.10. Strip strains in beam B-06/S: a) strain measurements on bottom strip, b) strain measurements on side strips

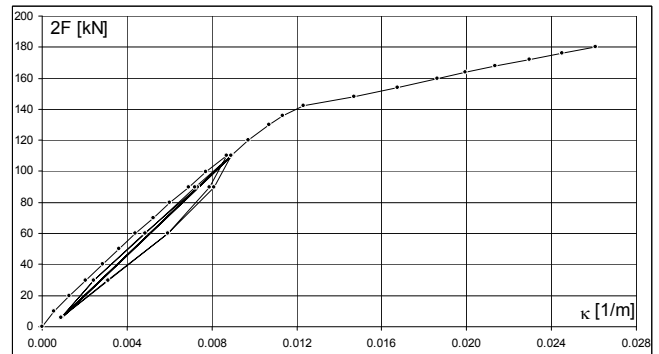
Wyraźnie większe były natomiast odkształcenia taśmy w przypadku belek, które zniszczyły się w sposób „Z”. Odspojenie taśmy występowało przy zbliżonych odkształceniach, a maksymalne odkształcenia taśmy w chwili zniszczenia wynosiły w belkach obu serii nieco ponad 5‰. Można zatem przyjąć, że te graniczne odkształcenia nie zależały od schematu obciążania belki. Badania wykazały też, że wstępne obciążenie belki, przy przyklejaniu taśmy, nie miało wpływu na odkształcenia w chwili zniszczenia (odspojenia taśmy). W zbliżony sposób kształtowały się również krzyżowiny obu porównywanych belek B-08/S i BO-08/S (rys. 4.11 i 4.12).

On the other hand, distinctly greater were strip strains in case of beams that failed in „Z” mode. De-bonding of the strip occurred at similar strains and maximum strip strains at failure were slightly above 5‰ in beams of both series. It can be therefore assumed that these limit strains did not depend on loading scheme of the beam. Investigations also proved that initial stressing of the beam before the strip bonding did not influence on strains at failure (during the plate de-bonding). Curvatures of both compared beams - B-08/S and BO-08/S were similar shaped (Figs 4.11 and 4.12).



Rys. 4.11. Zależność 2F - κ (obciążenie - krzywizna) dla belki B-08/S

Fig. 4.11. 2F - κ (loading - curvature) relationship - in the beam B-08/S

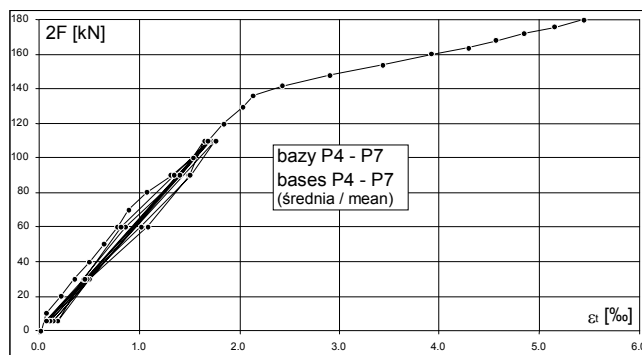


Rys. 4.12. Zależność 2F - κ (obciążenie - krzywizna) dla belki BO-08/S

Fig. 4.12. 2F - κ (loading - curvature) relationship - in the beam BO-08/S

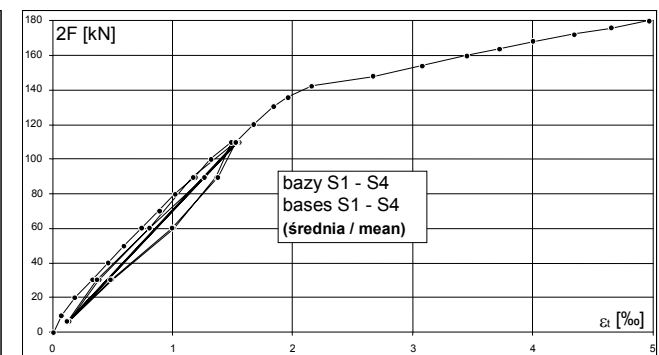
Porównując wykresy średnich odkształceń taśmy na odcinku czystego zginania dla belki B0-08/S (rys. 4.13) i wykresy średnich odkształceń włókna rozciąganego w poziomie 35mm ponad taśmą (rys. 4.14), można zauważyć wyraźny ubytek sztywności belki po uplastycznieniu zbrojenia, objawiający się załamaniem wykresów przy obciążeniu 2F=142kN. Można też zauważyć, że począwszy od obciążenia 2F=154kN odkształcenia taśmy przyrastają wolniej niż odkształcenia w poziomie zbrojenia rozciąganego (rys. 4.14). Świadczy to o rozpoczynającym się przy tym obciążeniu procesie destrukcji zespolenia taśmy z belką. Te same prawidłowości potwierdzają pomiary odkształceń belki B-08/S.

Comparing diagrams of bottom strip strains over the pure bending distance in the beam BO-08/S, (Fig. 4.13) and diagrams of mean tensile strains of concrete at 35mm level above the strip, (Fig. 4.14) a noticeable loss of beam stiffness can be seen after the reinforcement yielded. It resulted in a change of inclination of the graph at loading of 2F=142kN. One can notice that beginning from load of 2F=154kN strip strains are growing slower than strains at the level of tension reinforcement (Fig. 4.14). It indicates the beginning of bond destruction between the strip and the beam. Strain measurements of the beam B-08/S confirm the same regularities.



Rys. 4.13. Odkształcenia taśmy w belce BO-08/S

Fig. 4.13. Strip strains in the beam BO-08/S



Rys. 4.14. Odkształcenia w poziomie rozciąganego włókna przekroju (a=35mm) w belce BO-08/S

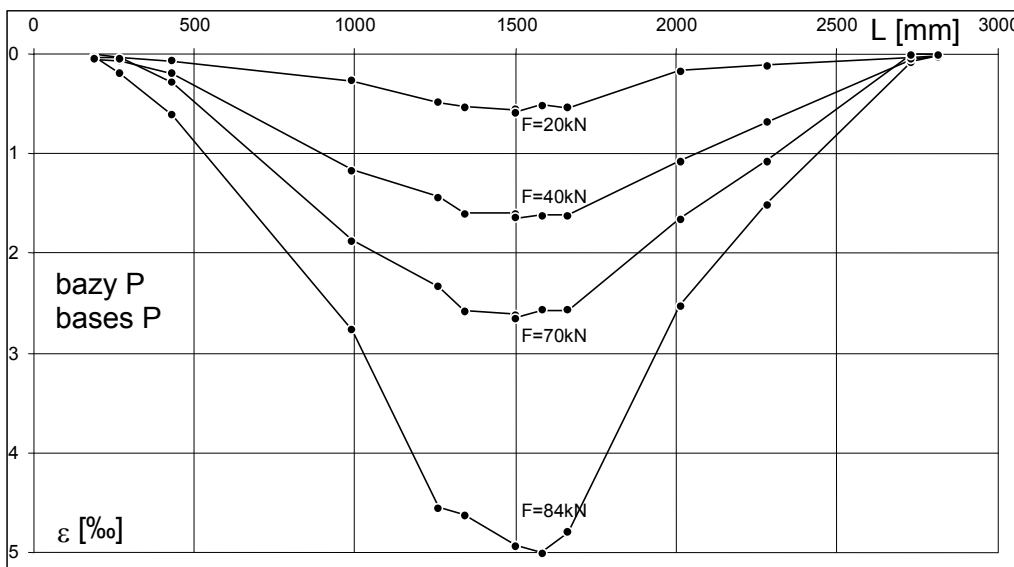
Fig. 4.14. Strains at the cross-section level (a=35mm) above tension edge of the beam BO-08/S

Analizując odkształcenia taśmy CFRP w belce BF-06/S można zauważyć, że taśma odkształcała się w przybliżeniu jednakowo po obu stronach belki, także przy największym zarejestrowanym obciążeniu (rys. 4.15).

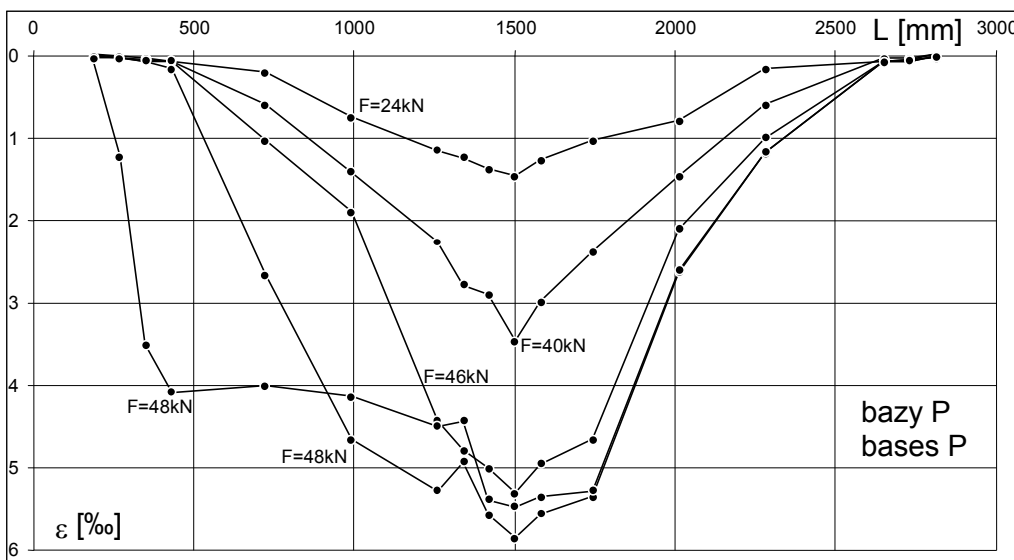
Zniszczenie belki BF-04/0.5S nastąpiło w trakcie rejestrowania wyników, a ponieważ przy każdym poziomie obciążenia program odczytywał wskazania czujników 20 razy co 1.5 sekundy, możliwe stało się prześledzenie procesu odspojenia taśmy (rys. 4.16). Odkształcenia taśmy, początkowo symetryczne, zaczęły wyraźnie wzrastać – przy tym samym obciążeniu $F=48\text{kN}$ – w kierunku jednej z podpór. Świadczy to o tym, że na wciąż powiększającym się odcinku belki taśma zachowywała się jak ściąg, połączony z belką tylko lokalnie na końcach.

It can be noticed that analysing strains of the CFRP strip in the beam BF-06/S that strip strains were approximately equal on both sides of the beam, also at the greatest loading recorded (Fig. 4.15).

The destruction of the beam BF-04/0.5S appeared during recording of the measurements. Because of high frequency of recording (20 times every 1.5 sec.) it was possible to monitor the process of the strip de-bonding (Fig. 4.16). Initially symmetric strip strains began to rise visibly (at the same load, $F=48\text{kN}$) in the direction of one of the supports. This proves that on ever increasing length of beam the strip was behaviour as a bowstring connected with the beam only locally at the strip ends.



Rys. 4.15. Odkształcenia taśmy w belce BF-06/S
Fig. 4.15. Strip strains in beam BF-06/S



Rys. 4.16. Odkształcenia taśmy w belce BF-04/0.5S
Fig. 4.16. Strip strains in beam BF-04/0.5S

Odszparowaniu się taśmy towarzyszyły trzaski, można było zauważyć prześwit między belką a taśmą, a cały proces zniszczenia trwał około 18 sekund. Maksymalne odkształcenia taśmy wynosiły 5.80‰ (por. rys. 4.16) i były tego samego rzędu, co w belkach obciążonych dwiema siłami skupionymi, a więc o długim odcinku (4h), poddanym czystemu zginaniu.

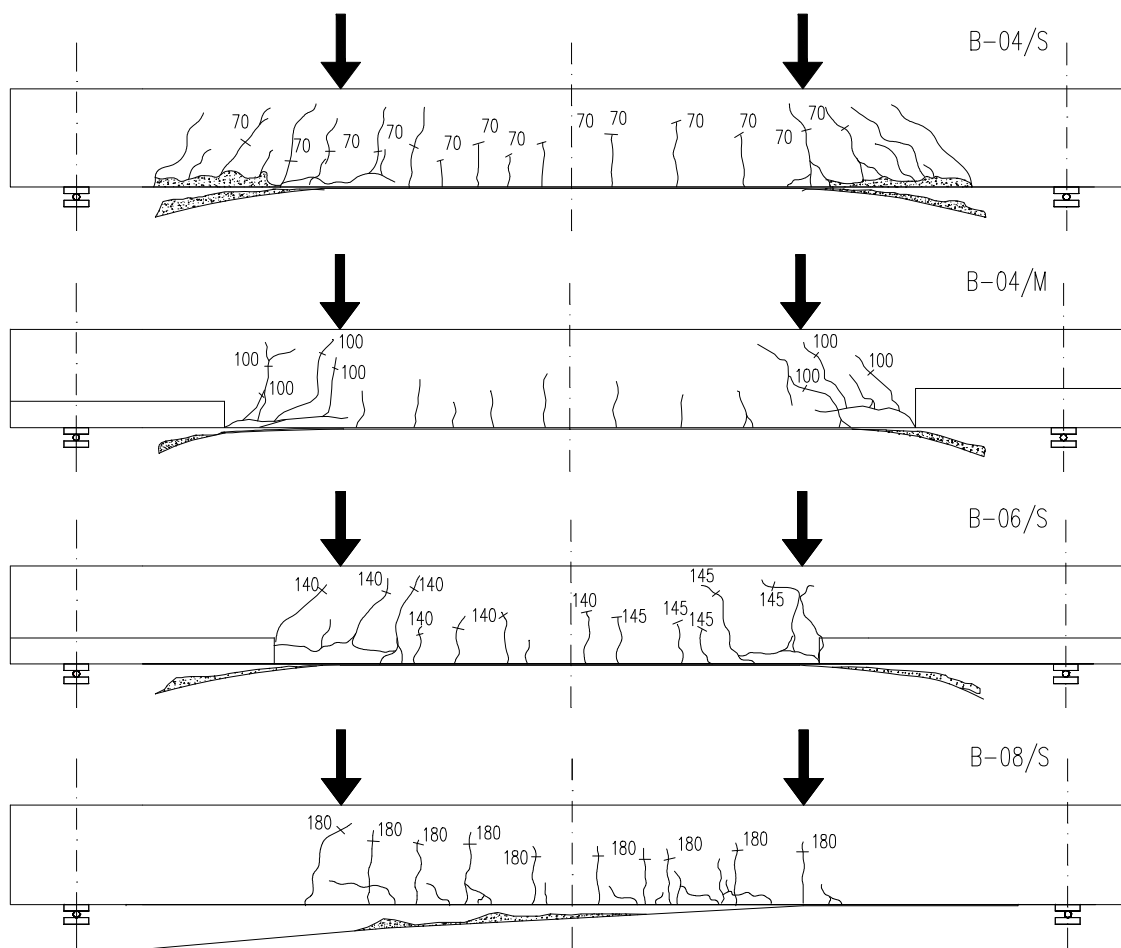
4.3. Zarysowanie i ugięcie

Układ rys po zniszczeniu wszystkich belek przedstawiono na rys. 4.17. Jak widać, w belkach, które zniszczyły się w sposób „P”, odszparowaniu końca taśmy towarzyszyło silne zarysowanie strefy przypodporowej. W miarę zwiększania obciążenia rosło pochylenie rys ukośnych, aż do całkowitego odszparowania taśmy na krótkim odcinku. Zastosowanie dodatkowych taśm na bocznych powierzchniach belek powodowało przesunięcie obszaru zarysowania w stronę środka belki. W przypadku belek, które zniszczyły się w sposób „Z”, rejestrowano rysy typowe dla zginania, z tendencją do ich rozwoju w strefie przypodporowej, w kierunku której postępowało odszparowanie taśmy.

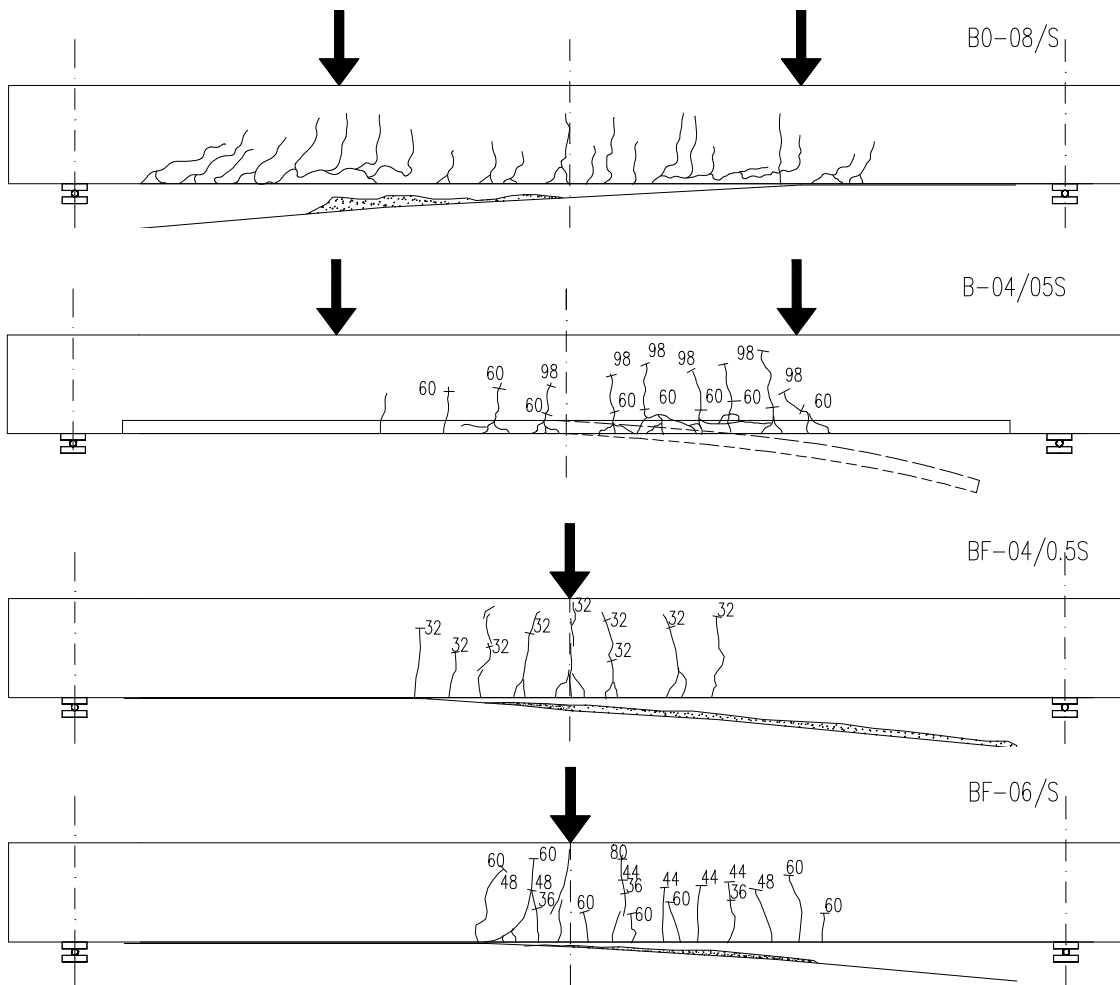
Noises accompanied the de-bonding of the strip. A chink could be seen between the beam and the strip and entire process of destruction lasted about 18 seconds. Maximum strip strains amounted to 5.80‰ (cf Fig. 4.16) and were of the same grade as in beams loaded by two concentrated forces, and therefore having long distance (4h) subjected pure bending.

4.3. Cracking and deflection

Maps of cracks after destruction of all beams are shown in Fig. 4.17. As it can be seen, in beams that failed by mode „P”, the de-bonding of strip ends was accompanied by extensive cracking of support zone. With increasing load, inclination of cracks was growing till total de-bonding of the strip over a short length. Application of additional strips on both sides resulted in shifting the cracked region towards beam centre. In cases of beams that failed in mode „Z”, cracks typical for bending were recorded, with tendency to develop in the support region, where the strip de-bonding progressed.



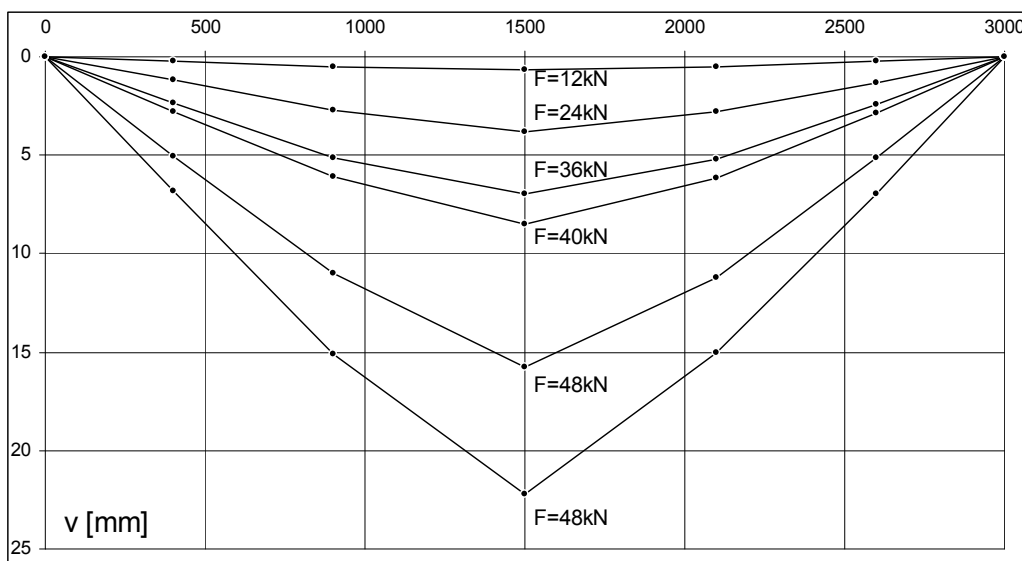
Rys. 4.17. Układ rys po zniszczeniu belek
Fig. 4.17. Crack pattern after failure of the beams



Rys. 4.17. c.d. Układ rys po zniszczeniu belek
 Fig. 4.17. cont. Crack pattern after failure of the beams

Ugięcia belek kształtowały się symetrycznie względem podpór, prawie w całym zakresie obciążeń. Dla porównania, na rys. 4.18 pokazano ugięcia belki BF-04/0.5S zarejestrowane w chwili zniszczenia.

Beam deflections were symmetric with respect to supports within almost entire range of loads. For comparison, the deflections of the beam B-04/0.5S recorded at the failure are shown in Fig. 4.18.

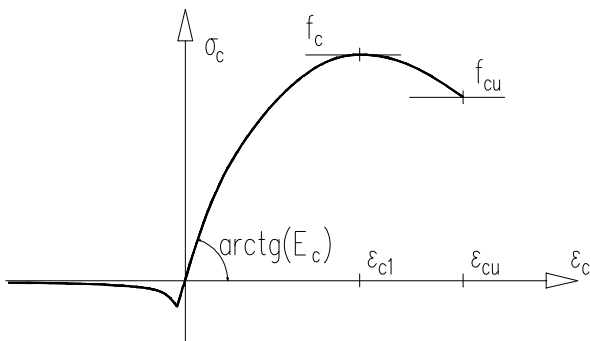


Rys. 4.18. Ugięcia belki BF-04/0.5S
 Fig. 4.18. Deflections of the beam BF-04/0.5S

5. OBLICZENIOWY OPIS ZACHOWANIA SIĘ BELEK POD OBCIĄŻENIEM

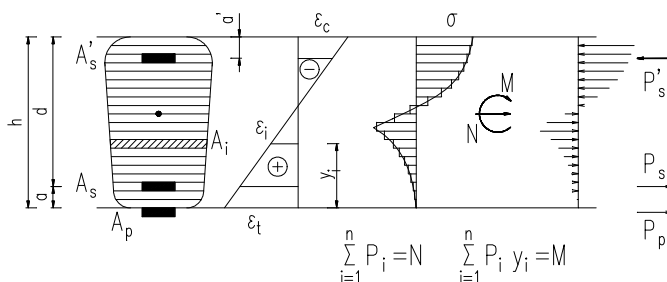
Do opisu odkształceń, przemieszczeń i nośności zginanych elementów żelbetowych wzmocnionych taśmami CFRP zastosowano model nieliniowej analizy żelbetowych elementów prętowych według Kamińskiej i Czkwianianca, [4], w którym przyjęto następujące założenia:

- rozważa się tylko naprężenia normalne,
- w całym zakresie obciążeń obowiązuje zasada zachowania płaskiego przekroju,
- nieliniowa zależność σ - ε dla betonu strefy ściskanej (rys. 5.1) opisana jest w funkcji wytrzymałości betonu i prędkości narastania odkształcenia,
- zależności σ - ε dla betonu, stali zbrojeniowej i taśm (rys. 5.2), są ustalone doświadczalnie dla jednoosiowego stanu naprężenia,
- odkształcenia zbrojenia i otaczającego je betonu są jednakowe zarówno w strefie ściskanej jak i rozciąganej,
- beton strefy rozciąganej przenosi naprężenia także po zarysowaniu (zasada tension stiffening),
- rysy prostopadłe do osi pręta są rozmyte na jego długości, co oznacza uśrednienie odkształceń i naprężeń strefy rozciąganej.



Rys. 5.1. Zależność σ - ε dla betonu
Fig 5.1. σ - ε relationship for concrete

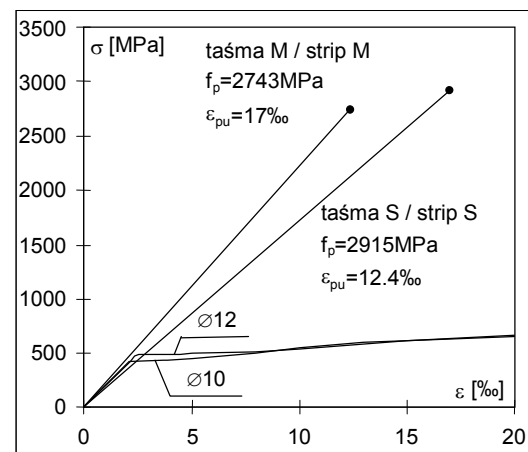
Przekrój zostaje podzielony na wysokości na dowolną liczbę warstw (rys. 5.3), zwykle około 150. Zbrojenie jest traktowane jako odrębna warstwa (lub kilka warstw) o znanym położeniu i znanym polu przekroju. W ten sam sposób jak zbrojenie potraktowana jest taśma CFRP.



5. THEORETICAL ANALYSIS OF THE LOADED BEAMS BEHAVIOUR

Description of strains, displacements and capacities of reinforced concrete elements strengthened using CFRP strips, subjected to bending, was carried out using non-linear analysis model of one-dimensional members by Kaminska and Czkwianianc [4] in which following assumptions were adopted:

- normal stresses only are considered,
- principle that plane sections remain plane,
- non-linear relationship σ - ε for concrete under compression (Fig. 5.1) is defined as a function of concrete strength and speed of strain increase,
- σ - ε relationships for concrete, reinforcing steel and CFRP strips (Fig. 5.2) are established by experiment for uni-axial state of strain,
- strains in reinforcement and concrete round it are equal both in compressive and tensile area,
- in tension area, concrete transfers tension stresses also after cracking (tension stiffening principle)
- cracks perpendicular to element axis are fuzzy over its length; this means averaging of strains and stresses in tension area.



Rys. 5.2. Zależność σ - ε dla stali zbrojeniowej i taśm
Fig 5.2. σ - ε relationship for reinforcing steel and CFRP strips

The cross-section is divided over its depth into arbitrary number of layers (Fig. 5.3), usually about 150. Reinforcement is treated as a separate layer (or several layers) of known position and known cross-sectional area. CFRP strips are treated in the same way.

Rys. 5.3. Odkształcenia, naprężenia i siły w żelbetowym przekroju podzielonym na warstwy

Fig. 5.3. Strains, stresses and forces in concrete cross-section divided into layers

Procedurę obliczeniową należy przeprowadzić następująco:

1. Przyjęcie jako danego odkształcenia skrajnego włókna przekroju, dolnego (ϵ_i) lub górnego (ϵ_c).
2. Założenie krzywizny przekroju (κ) i określenie odkształceń poszczególnych warstw przekroju (ϵ_i).
3. Określenie sił wewnętrznych normalnych w każdej warstwie na podstawie zależności σ - ϵ danego materiału i pola przekroju warstwy.
4. Sprawdzenie warunku równowagi uogólnionych sił w przekroju:
 - a) $\sum M=0$ (względem punktu O), jeżeli $M=\text{const.}$,
 - b) $\sum F=0$, jeżeli $N=\text{const.}$

Jeżeli warunek równowagi nie jest spełniony, należy powrócić do p.2 i skorygować krzywiznę.

5. Ustalenie z drugiego warunku równowagi poszukiwanego obciążenia zewnętrznego (N lub M).
6. Powrót do p. 1 i przyjęcie kolejnego odkształcenia skrajnego włókna przekroju.

Za nośność przekroju zostaje uznane takie obciążenie, przy którym zostają osiągnięte graniczne odkształcenia któregoś z materiałów: ϵ_{pu} - taśmy, ϵ_{cu} - betonu lub ϵ_{su} - stali.

Porównanie obliczeniowych i doświadczalnych zależności 2F - κ (obciążenie - średnia krzywizna) przedstawiają rysunki 5.4. do 5.9.

Calculation procedure should be carried out as follows:

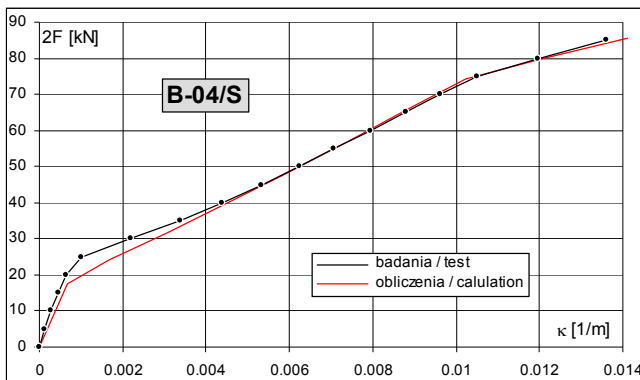
1. Assumption of extreme fibre strain (upper ϵ_i or lower ϵ_c) as given.
2. Assumption of cross-section curvature (κ) and determination of strains in the remaining fibres of cross-section (ϵ_i).
3. Definition of normal internal forces in each layer on basis of σ - ϵ relation for the given material and the cross-sectional area of layer.
4. Checking of equilibrium condition of generalised forces in the cross-section:
 - a) $\sum M=0$ (with respect to point O), if $M=\text{const.}$
 - b) $\sum F=0$, if $N=\text{const.}$

If equilibrium condition is not satisfied, it is necessary to return to point 2 and adjust the curvature.

5. Determination of external load (N or M) from the second condition of equilibrium.
6. Return to point 1 and assumption of consecutive strain value in extreme fibre of cross-section.

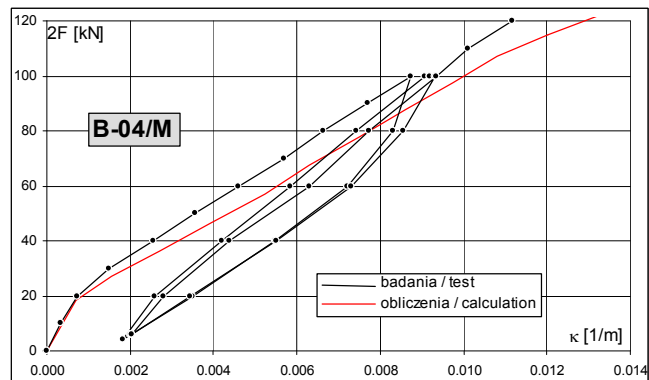
Load at which limit strain in one of the materials is reached (ϵ_{pu} - of strip, ϵ_{cu} - of concrete, ϵ_{su} - of steel) is accepted as the capacity of cross-section.

Comparison of the calculated and experimental relationships 2F - κ (load - mean curvature) is shown in Figs. 5.4 to 5.9.



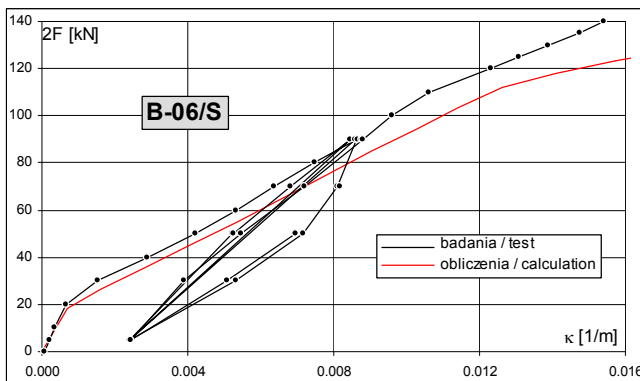
Rys. 5.4. Porównanie wykresów obliczeniowych i doświadczalnych – belka B-04/S

Fig. 5.4. Comparison of calculated and experimental diagrams for the beam B-04/S



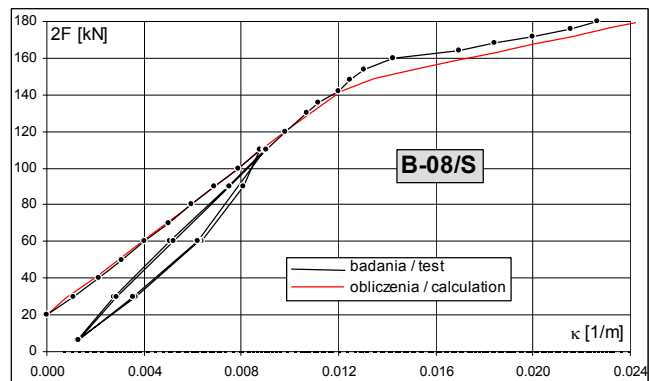
Rys. 5.5. Porównanie wykresów obliczeniowych i doświadczalnych – belka B-04/M

Fig. 5.5. Comparison of calculated and experimental diagrams for the beam B-04/M



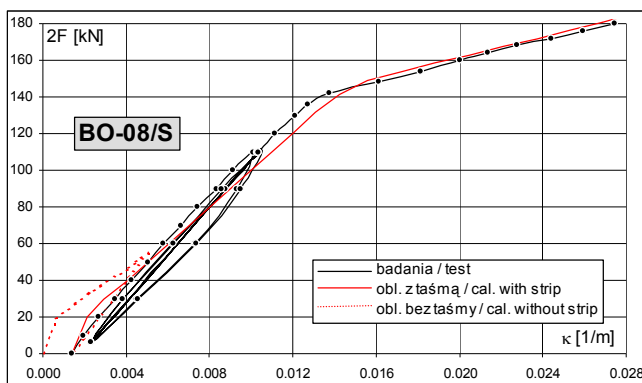
Rys. 5.6. Porównanie wykresów obliczeniowych i doświadczalnych – belka B-06/S

Fig. 5.6. Comparison of calculated and experimental diagrams for the beam B-06/S



Rys. 5.7. Porównanie wykresów obliczeniowych i doświadczalnych – belka B-08/S

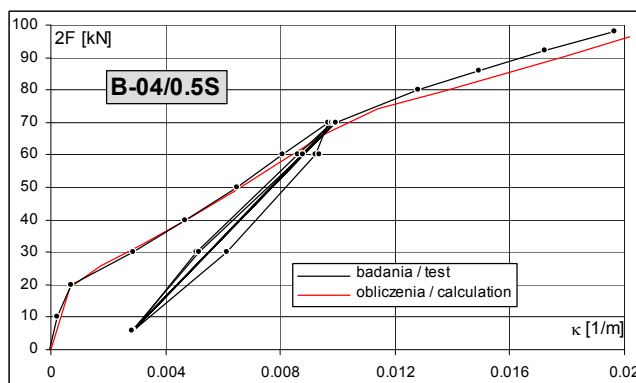
Fig. 5.7. Comparison of calculated and experimental diagrams for the beam B-08/S



Rys. 5.8. Porównanie wykresów obliczeniowych i doświadczalnych – belka B0-08/S

Fig. 5.8. Comparison of calculated and experimental diagrams for the beam B0-08/S

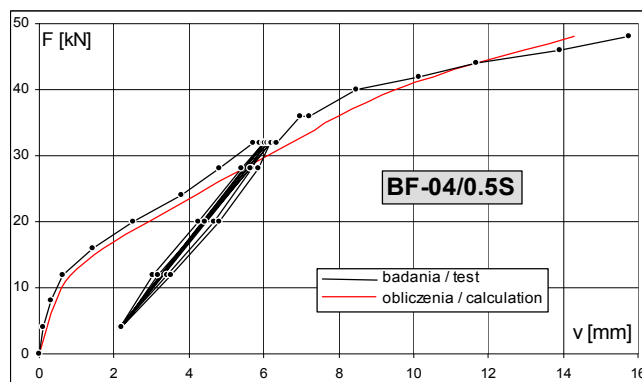
Dla belek obciążonych jedną siłą w środku rozpiętości dokonano porównania obliczeniowych i doświadczalnych zależności $F - v$ (obciążenie - ugięcie) (rys. od 5.10 do 5.11).



Rys. 5.9. Porównanie wykresów obliczeniowych i doświadczalnych – belka B-04/0.5S

Fig. 5.9. Comparison of calculated and experimental diagrams for the beam B-04/0.5S

For beams loaded by a single concentrated force at the mid-span, comparison of calculation and experimental relationships $F - v$ was carried out (Figs. 5.10 to 5.11).

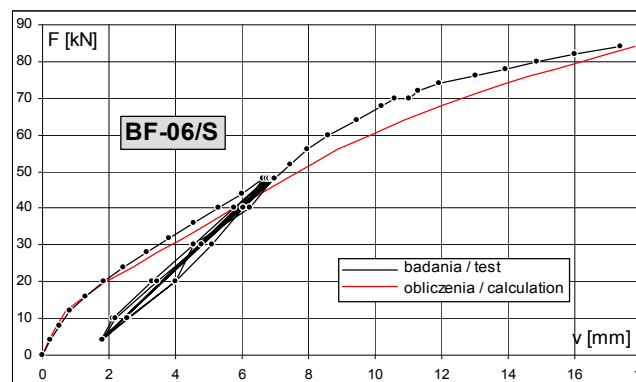


Rys. 5.10. Porównanie obliczeniowych i doświadczalnych ugięć w połowie rozpiętości belki – belka BF-04/0.5S

Fig. 5.10. Comparison of calculated and experimental deflections at mid-span for the beam BF-04/0.5S

Jak można zauważyć, wykresy potwierdzają poprawność przyjętego modelu obliczeniowego w całym zakresie obciążeń uzyskanym w badaniach. Dotyczy to również belki wzmocnionej taśmami przyklejanymi na bocznych powierzchniach (B-04/0.5S).

Ten sam sposób obliczania wg [4] zastosowano już wcześniej do obliczeniowej weryfikacji badań żelbetowych belek wzmocnionych taśmami CFRP, wykonanych przez zespół: Nanni, Arduini, Tommaso [5], także uzyskując zgodność obliczeniowych i doświadczalnych zależności ($M - \kappa$) [6].



Rys. 5.11. Porównanie obliczeniowych i doświadczalnych ugięć w połowie rozpiętości belki – belka BF-06/S

Fig. 5.11. Comparison of calculated and experimental deflections at mid-span for the beam BF-06/S

As can be seen, the diagrams confirm the correctness of the adopted analytical model over the entire range of loads carried out in tests. This applies also to the beam strengthened by strips bonded to both sides of the beam (B-04/0.5S).

The same method of calculation after [4] was applied earlier to analytical verification of tests on reinforced concrete beams strengthened by CFRP strips, carried out by team: Nanni, Arduini and Tommaso [5], also obtaining good agreement of analytical and experimental results ($M - \kappa$) [6].

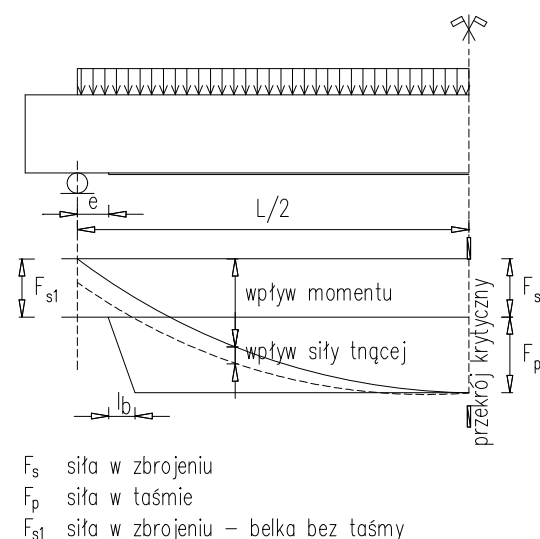
6. RODZAJE TAŚM A MOŻLIWOŚCI ICH WYKORZYSTANIA

6.1. Przekroje krytyczne

Z pomiarów i spostrzeżeń dokonanych w trakcie badań wynika, że zniszczenie przez odspojenie taśmy związane jest ze stanem odkształcenia elementu. Do zniszczenia zginanych belek wzmocnionych taśmami CFRP może dojść w jednym z dwóch przekrojów krytycznych:

- w obszarze występowania maksymalnego momentu zginającego,
- w strefie kotwienia taśmy głównej.

W pierwszym wypadku proces odspajania się taśmy (model zniszczenia „Z”), rozpoczyna się w obszarze maksymalnego momentu, przy odkształceniach taśmy około 5.2‰. W przekroju przez koniec taśmy, rozciągające siły w zbrojeniu od łącznego wpływu momentu i siły poprzecznej nie powodują natomiast uplastycznienia zbrojenia (rys. 6.1).



F_s siła w zbrojeniu
 F_p siła w taśmie
 F_{s1} siła w zbrojeniu – belka bez taśmy

Rys. 6.1. Przekrój krytyczny w miejscu maksymalnego momentu zginającego - obwiednie sił od obciążenia zewnętrznego i zdolności nośnych zbrojenia zwykłego i taśmy CFRP

Fig. 6.1. Critical cross-section through the position of maximum bending moment - envelopes of external loads, and load capacities of steel reinforcement and CFRP strip

Drugi sposób zniszczenia (model „P”), dotyczący przypodporowej strefy belki również związany jest z odkształceniami. Proces odspajania końca taśmy rozpoczyna się wtedy, gdy w sąsiednim, nie wzmocnionym przekroju dochodzi do uplastycznienia rozciąganego zbrojenia (rys. 6.2). Towarzyszy temu gwałtowny przyrost szerokości rozwarcia ukośnej rysy przebiegającej w pobliżu końca taśmy i postępująca utrata przyczepności betonu do zbrojenia w sąsiedztwie rysy. Przekrój przez koniec taśmy okazuje się więc krytyczny, jeżeli zbrojenie belki uplastyczni się w tym przekroju (od łącznego działania momentu zginającego i siły poprzecznej) wcześniej, niż w taśmie wystąpią odkształcenia graniczne, rzędu 5‰.

Zastosowanie dodatkowych taśm na bocznych powierzchniach belek powoduje, że przekrój krytyczny odsuwa się od podpory (rys. 6.3), a tym samym rośnie skuteczność wzmocnienia. Rysunek wyjaśnia też, dlaczego wpływ wydłużenia zakładu taśm jest ograniczony.

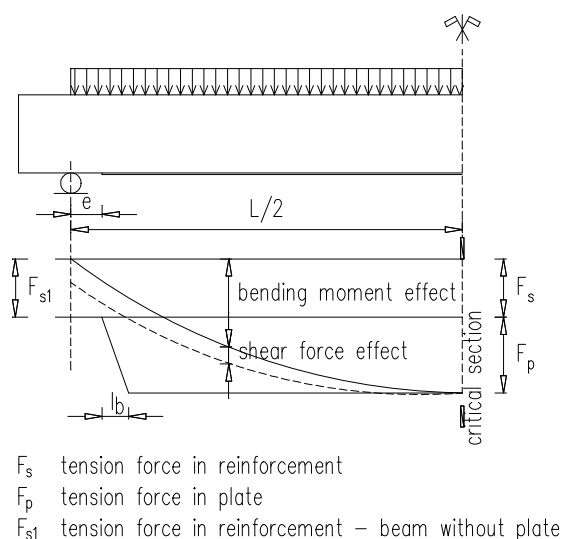
6. TYPES OF THE STRIPS AND EFFECTIVENESS OF THEIR USAGE

6.1. Critical cross-sections

From measurements and observations during the tests follows that failure by the strip de-bonding is connected with the state of the strain in the element. The failure of the beams strengthened by CFRP strips can occur in one of the two critical cross-sections:

- in the region of maximum bending moment,
- in the region of anchorage of main strip.

In first case, the process of the strip de-bonding („Z” mode of destruction) starts in the region of maximum moment, at strip strains of about 5.2‰. In the vertical cross-section through strip end, tensile forces in steel reinforcement due to bending moment and shear force do not cause reinforcement yielding (Fig. 6.1).



F_s tension force in reinforcement
 F_p tension force in plate
 F_{s1} tension force in reinforcement – beam without plate

Rys. 6.1. Przekrój krytyczny w miejscu maksymalnego momentu zginającego - obwiednie sił od obciążenia zewnętrznego i zdolności nośnych zbrojenia zwykłego i taśmy CFRP

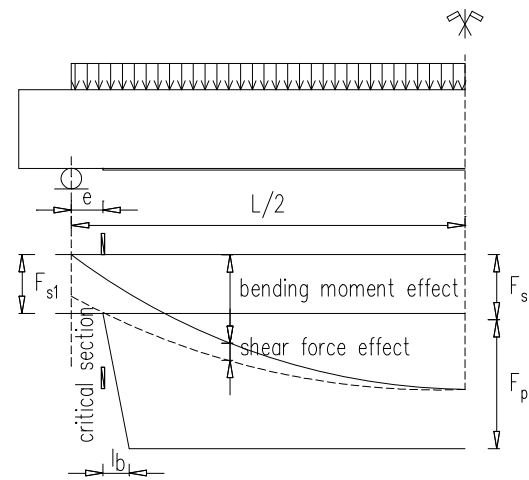
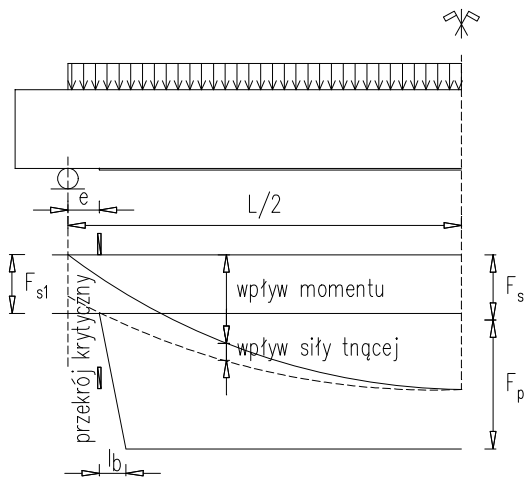
Fig. 6.1. Critical cross-section through the position of maximum bending moment - envelopes of external loads, and load capacities of steel reinforcement and CFRP strip

Second kind of failure („P” mode) concerning the support region of the beam is also connected with strains. The process of the strip de-bonding starts when in the neighbouring (unstrengthened) cross-section yielding of the tensile reinforcement occurs (Fig. 6.2). This is accompanied by sudden growth of inclined crack width running near the strip end as well as progressive loss of bond between concrete and steel in the vicinity of crack. Cross-section through the strip end proves therefore critical, if beam reinforcement yields in this cross-section (due to joint action of bending moment and shear force) earlier than limit stress of the order of 5‰ occurs in the strip.

Application of additional strips on both sides of the beams causes the critical cross-section to move away from the support (Fig. 6.3) and thus increases the effectiveness of strengthening. This Figure also explains why the influence of the strip overlap is limited.

Trzeba przy tym pamiętać, że boczne taśmy są wykorzystywane w małym stopniu, gdyż ich odkształcenia i naprężenia maleją wraz ze zmniejszaniem się odległości od rozciąganej krawędzi przekroju.

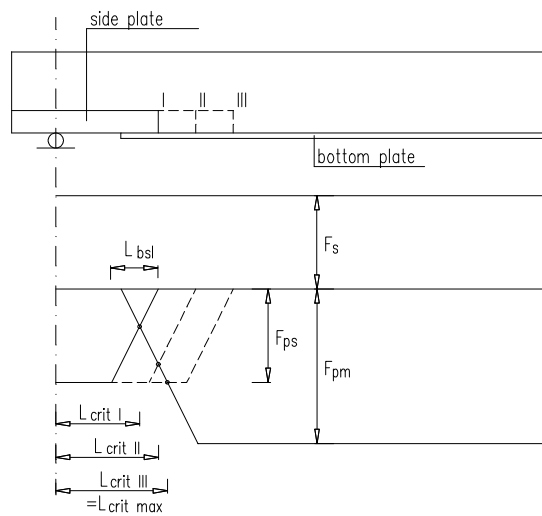
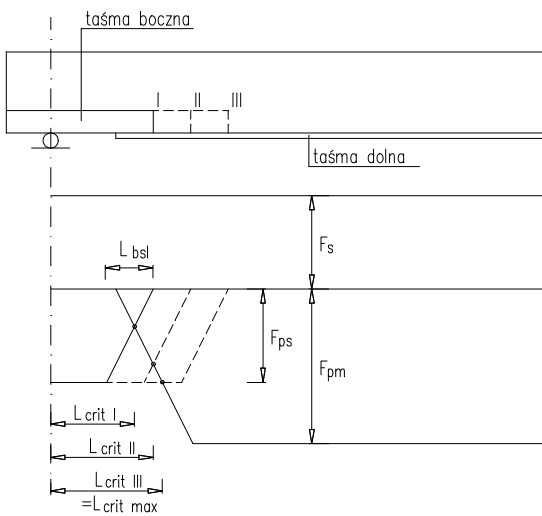
One should also remember that side strips are useful in a small degree, because their strains and stresses are diminishing with the growing distance from the tensioned edge of cross-section.



F_s siła w zbrojeniu
 F_p siła w taśmie
 F_{s1} siła w zbrojeniu – belka bez taśmy

F_s tension force in reinforcement
 F_p tension force in plate
 F_{s1} tension force in reinforcement – beam without plate

Rys. 6.2. Przekrój krytyczny na końcu taśmy
 Fig. 6.2. Critical cross-section at strip end



Rys. 6.3. Wpływ długości zakładu taśm bocznych z taśmą dolną na nośność elementu (F_{ps} - siła w taśmie bocznej, F_{pm} - siła w taśmie dolnej)
 Fig. 6.3. Influence of overlap length of side and bottom strips on load capacity of element (F_{ps} - force in side strip; F_{pm} - force in bottom strip)

Analizując odkształcenia przekroju obciążonego maksymalnym momentem oraz odkształcenia przekroju przez koniec taśmy można ustalić, w którym przekroju wcześniej zostaną osiągnięte odkształcenia graniczne (taśmy lub zbrojenia). Tym samym można przewidzieć, w którym miejscu odspoi się taśma i przy jakim obciążeniu to nastąpi.

Analysing strains in cross-section subjected to maximum moment and strains in cross-section through the strip end it can be determined in which cross-section limit strains (in strip or reinforcement) are reached first. It can be therefore predicted in what place the strip shall lose adhesion and at what loading this shall occur.

6.2. Stopień zbrojenia a efekt wzmocnienia belek

Stopień wzmocnienia belek można ocenić porównując sztywności i nośności belek wzmocnionych i nie wzmocnionych.

Porównania takiego dokonano dla belek I serii, rozważając krzywizny doświadczalne belek wzmocnionych i krzywizny obliczeniowe belek nie wzmocnionych (rys. 6.4 - 6.9).

Jak można zauważyć, stopień wzmocnienia jest tym większy, im niższy jest stopień zbrojenia przekroju. Uwaga ta dotyczy także sztywności belek po zarysowaniu.

Typ taśmy CFRP i stopień zbrojenia taśmą także mają istotne znaczenie, co wynika z wykresów na rys. 6.4 i 6.5. Pierwszy rysunek dotyczy belki B-04/S wzmocnionej taśmą typu S o polu przekroju $A_p=96\text{mm}^2$ i module sprężystości $E_p=172\text{GPa}$. Przyrost sztywności belki po zarysowaniu wyniósł około 60%, natomiast przyrost nośności zależał od odległości końca taśmy od podpory. Przy odległości $e=150\text{mm}$ przyrost nośności wyniósł 140% ($2F_u=120\text{kN}$ - dla belki wzmocnionej i $2F_u=50\text{kN}$ - dla belki nie wzmocnionej), zaś przy odległości 300mm - 80% ($2F_u=90\text{kN}$ - dla belki wzmocnionej i $2F_u=50\text{kN}$ - dla belki nie wzmocnionej).

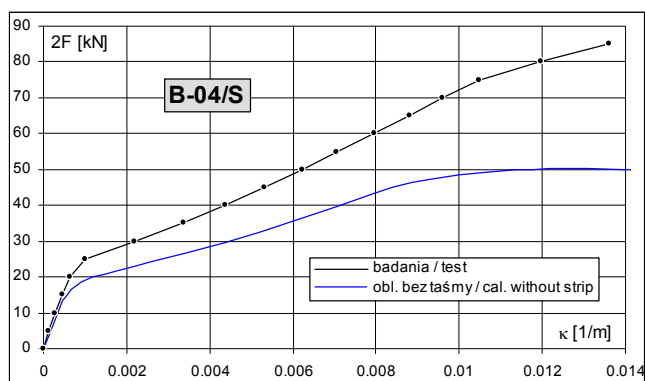
6.2. Reinforcement ratio and effectiveness of beam strengthening

Strengthening ratio of beams can be evaluated comparing stiffness and capacities of beams with or without strengthening.

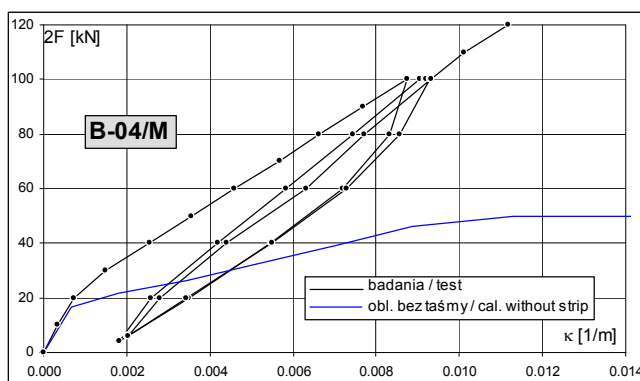
Such comparison was carried out for beams of series I, considering experimental curvatures of strengthened beams and theoretical curvatures of unstrengthened beams (Figs. 6.4 to 6.9).

As can be noticed, strengthening ratio is greater when the ratio of reinforcement of cross-section is smaller. This remark applies also to stiffness of the beams after cracking.

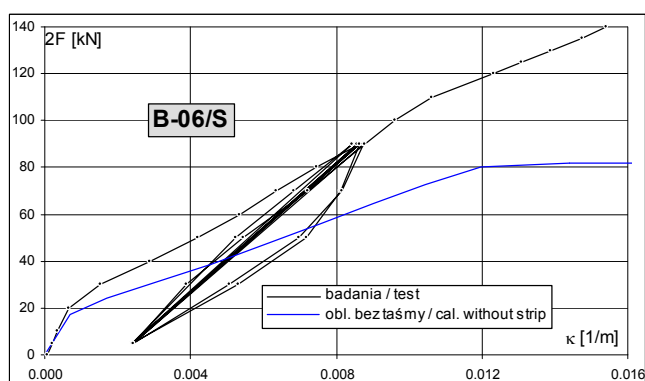
Type of CFRP strip and reinforcement ratio is very important, it proves by diagrams in Figs 6.4 and 6.5. First diagram concerns the beam B-04/S strengthened by the strip of type „S” ($A_p=96\text{mm}^2$ and $E_p=172\text{GPa}$). Increase of the beam stiffness after cracking amounted to 60%. Increase of carrying capacity on the other hand depended on the distance of the strip end from the support. At distance $e=150\text{mm}$ carrying capacity increase was 140% ($2F=90\text{kN}$ for strengthened beam and $2F=50\text{kN}$ for unstrengthened).



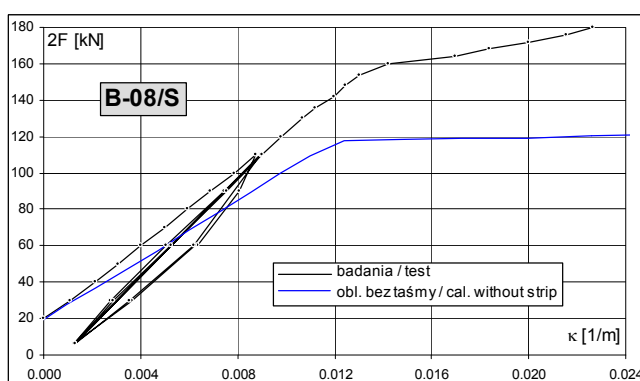
Rys. 6.4. Porównanie wykresów obciążenie - krzywizna belki wzmocnionej B-04/S i nie wzmocnionej
Fig. 6.4. Comparison of diagrams loading - curvature for strengthened and unstrengthened B-04/S beams



Rys. 6.5. Porównanie wykresów obciążenie - krzywizna belki wzmocnionej B-04/M i nie wzmocnionej
Fig. 6.5. Comparison of diagrams loading - curvature for strengthened and unstrengthened B-04/M beams



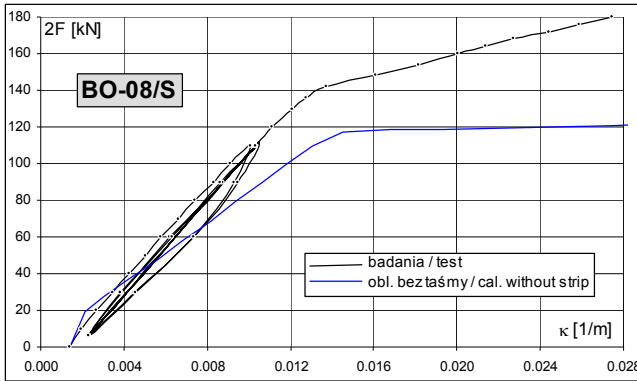
Rys. 6.6. Porównanie wykresów obciążenie - krzywizna belki wzmocnionej B-06/S i nie wzmocnionej
Fig. 6.6. Comparison of diagrams loading - curvature for strengthened and unstrengthened B-06/S beams



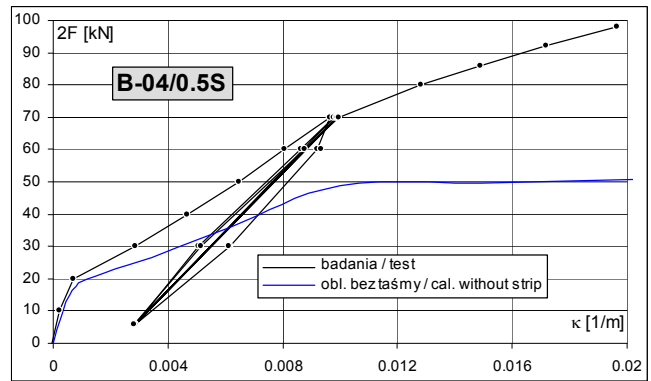
Rys. 6.7. Porównanie wykresów obciążenie - krzywizna belki wzmocnionej B-08/S i nie wzmocnionej
Fig. 6.7. Comparison of diagrams loading - curvature for strengthened and unstrengthened B-08/S beams

Belka B-04/M (rys. 6.5) została wzmocniona taśmą typu M o polu przekroju $A_p=168\text{mm}^2$ i $E_p=220\text{GPa}$. Doprowadziło to do zwiększenia sztywności belki po zarysowaniu o około 186%. Przyrost nośności tej belki był jednak nieco mniejszy niż przyrost sztywności i wynosił około 140%, co wynikało z modelu zniszczenia „P”, w strefie przypodporowej.

B-04/M (Fig. 6.5) was strengthened by strip of type M ($A_p=168\text{mm}^2$ and $E_p=220\text{GPa}$). This resulted in an increase of the beam stiffness after cracking of about 186%. Increase of carrying capacity was somewhat smaller than increase of stiffness and was 140%; this follows from the „P” mode of failure in the support region.



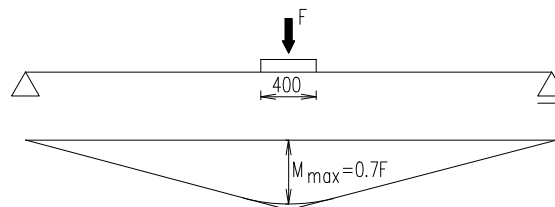
Rys. 6.8. Porównanie wykresów obciążenie - krzywizna belki wzmocnionej B0-08/S i nie wzmocnionej
Fig. 6.8. Comparison of diagrams loading - curvature for strengthened and unstrengthened B0-08/S beams



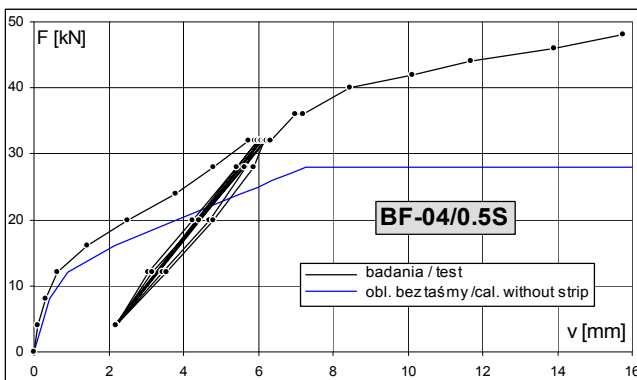
Rys. 6.9. Porównanie wykresów obciążenie - krzywizna belki wzmocnionej B-04/0.5S i nie wzmocnionej
Fig. 6.9. Comparison of diagrams loading - curvature for strengthened and unstrengthened B-04/0.5S beams

Do takich samych wniosków prowadzą wykresy przedstawione na rys. 6.11 i 6.12, dotyczące belek obciążonych jedną siłą skupioną. Na wykresach porównano doświadczalne ugięcia belek wzmocnionych z obliczeniowymi ugięciami belek nie wzmocnionych. Przy określaniu ugięć obliczeniowych założono, że siła skupiona w środku rozpiętości belki jest rozłożona na odcinku o długości $a=0.40\text{m}$ (rys. 6.10).

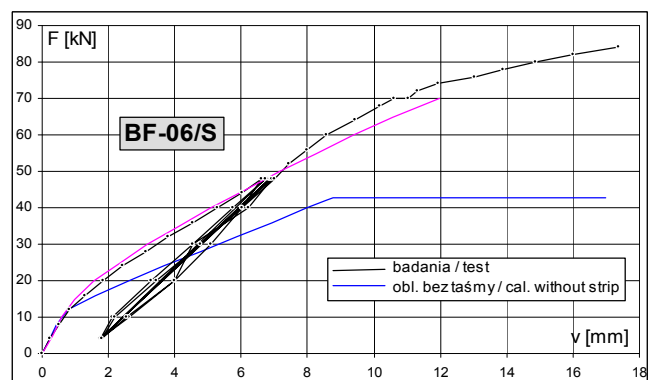
Diagrams shown in Figs 6.11 and 6.12 concerning beams loaded by a single concentrated force lead to the same conclusions. Experimental strengthened beam deflections are compared with analytical deflection of unstrengthened beams are compared in diagrams. When determining analytical deflections concentrated force at beam centre was assumed as uniformly distributed over $a=0.40\text{m}$ length.



Rys. 6.10. Sposób określania momentu maksymalnego M_{\max}
Fig. 6.10. Procedure of determination of maximum moment M_{\max}



Rys. 6.11. Porównanie wykresów obciążenie - ugięcie belki wzmocnionej BF-04/0.5S i nie wzmocnionej
Fig. 6.11. Comparison of diagrams loading - curvature for strengthened and unstrengthened BF-04/0.5S beams



Rys. 6.12. Porównanie wykresów obciążenie - ugięcie belki wzmocnionej BF-06/S i nie wzmocnionej
Fig. 6.12. Comparison of diagrams loading - curvature for strengthened and unstrengthened BF-06/S beams

We wszystkich obliczeniach dotyczących belek nie wzmocnionych przyjmowano dane geometryczne i materiałowe wynikające z badań odpowiednich belek wzmocnionych taśmami CFRP.

Obliczeniową analizę wpływu stopnia zbrojenia zwykłego i stopnia zbrojenia taśmą na nośność elementu w obszarze zginania (model zniszczenia „Z”) ilustruje rys. 6.13. W obliczeniach przyjęto:

- przekrój prostokątny,
- zbrojenie zwykłe: A-III (34GS), $f_y=f_t=410\text{MPa}$, $E_s=200\text{GPa}$, $\epsilon_{sy}=2.05\text{‰}$,
- beton: $f_{c,cube}=20\text{MPa}$,
- taśma: S, $f_p=2805\text{MPa}$, $E_p=165\text{GPa}$.

Za nośność przekroju uznawano takie obciążenie zewnętrzne (wyrażone jako moment sprowadzony), przy którym zostało osiągnięte graniczne odkształcenie betonu $|\epsilon_{cu}|=3.5\text{‰}$ lub graniczne odkształcenia taśmy CFRP $\epsilon_{plim}=5.2\text{‰}$. Na rysunku oznaczono też te obciążenia (linia przerywana), przy których obydwa odkształcenia graniczne zostają osiągnięte jednocześnie. Przy wartościach $\rho_s=A_s/bd$ i $\rho_p=A_p/bd$ znajdujących się poniżej linii odpowiadającej tym obciążeniom, o nośności decydują odkształcenia taśmy. W przedziale wartości powyżej omawianej linii, o nośności decydują odkształcenia betonu w strefie ściskanej, co oznacza, że taśma CFRP jest w jeszcze mniejszym stopniu wykorzystana ($\epsilon_p < \epsilon_{plim}$).

Z rys. 6.13 jasno wynika, że efekt wzmocnienia jest tym większy, im niższy jest stopień zbrojenia belki. Przy bardzo niskim stopniu zbrojenia, rzędu 0.2%, można osiągnąć aż blisko trzykrotne zwiększenie nośności. Przy tak dużym stopniu wzmocnienia siła w taśmie będzie jednak zdecydowanie większa niż siła w zbrojeniu (por. rys. 6.1 i 6.2), a to oznacza, że o nośności może decydować przekrój krytyczny przez koniec taśmy (por. rys. 6.2).

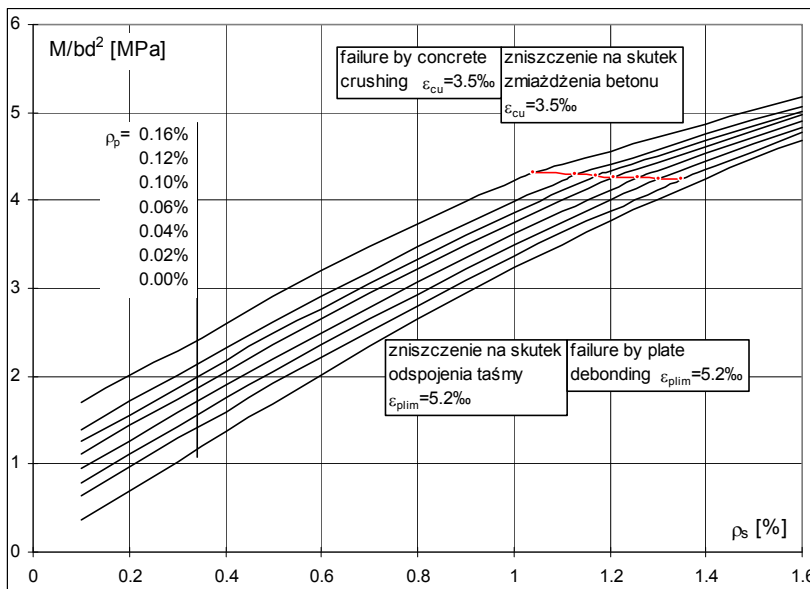
In all calculations concerning beams without strengthening, geometric and material data were adopted resulting from tests on corresponding beams strengthened by CFRP strips.

Theoretical analysis of influence of the reinforcement ratio and the strengthening ratio on load carrying capacity in bending area („Z” mode of failure) is shown in Fig. 6.13. Following assumptions were adopted in calculations:

- rectangular cross-section,
- ordinary reinforcement: A-III (34GS), $f_y=f_t=410\text{MPa}$, $E_s=200\text{GPa}$, $\epsilon_{sy}=2.05\text{‰}$,
- concrete: $f_{c,cube}=20\text{MPa}$,
- strip: S, $f_p=2805\text{MPa}$, $E_p=165\text{GPa}$.

External load (expressed as reduced moment) at which limit strain $|\epsilon_{cu}|=3.5\text{‰}$ was reached in concrete or limit strain ($\epsilon_{plim}=5.2\text{‰}$) was reached in CFRP strip, was recognised as cross-section load carrying capacity. In the drawing these loads are also marked (by broken line) at which both limit states have been reached simultaneously. For values $\rho_s=A_s/bd$ and $\rho_p=A_p/bd$ situated below lines corresponding to these loads, the carrying capacity depends on strip strains. In value range above the mentioned line, the capacity is limited by concrete strains in compressive area and this means that CFRP strip is used in even smaller proportion ($\epsilon_p < \epsilon_{plim}$).

It can be clearly seen from Fig. 6.13 that the lower is the reinforcement ratio of the beam, the greater is the effect of strengthening. At very low reinforcement ratio, of the order of 0.2%, the increase of carrying capacity was almost tripled. At so large a strengthening ratio, force in the strip shall be decidedly greater than force in reinforcement (see Figs 6.1 and 6.2) and this means that critical cross-section through the strip end can be decisive to load carrying capacity of the beam (see Fig. 6.2).



Rys. 6.13. Wpływ stopnia zbrojenia zwykłego i stopnia zbrojenia taśmą na nośność elementu w obszarze zginania
 Fig. 6.13. Influence of conventional reinforcement ratio and CFRP strip strengthening ratio on load carrying capacity in bending region

7. PODSUMOWANIE

Na podstawie wyników doświadczalnych i analiz obliczeniowych można stwierdzić, że:

- 7.1. Zastosowanie taśm przyklejanych do rozciąganej powierzchni elementów żelbetowych prowadzi do zwiększenia ich nośności na zginanie i sztywności.
- 7.2. Stopień wzmocnienia, opisany jako stosunek nośności belki wzmocnionej do nośności belki nie wzmocnionej, zależy od wielu czynników:
 - stopnia zbrojenia zwykłego,
 - rodzaju taśmy i stopnia zbrojenia taśmą,
 - stopnia zbrojenia na ścinanie,
 - odległości końców taśm od podpór,
 - rozkładu momentów zginających na długości elementu,
 - rozkładu sił poprzecznych,
 - wymiarów przekroju.
- 7.3. Nośność taśmy na rozciąganie nie może być wykorzystana, gdyż wcześniej odpaja się ona od powierzchni elementu. Stopień wzmocnienia elementu może być jednak wyraźny, zwłaszcza w elementach o niskim stopniu zwykłego zbrojenia.
- 7.4. Badania wykazały możliwość wystąpienia dwóch mechanizmów zniszczenia, różniących się przyczyną i miejscem usytuowania. Pierwszy występował w sąsiedztwie końca taśmy, a drugi w obszarze maksymalnego momentu.
- 7.5. Odspojenie końca taśmy jest związane z uplastycznieniem zbrojenia w przekroju, w którym nie współdziała już ona w przenoszeniu naprężeń normalnych.
- 7.6. Zastosowanie dodatkowych taśm na bocznych powierzchniach belki powoduje odsunięcie przekroju krytycznego od podpory. Nośność tego przekroju jest większa niż przekroju przez koniec taśmy głównej dzięki częściowemu współdziałaniu taśmy dolnej i taśm bocznych w przenoszeniu sił zewnętrznych. Można w ten sposób zwiększyć efektywność wzmocnienia lub nawet wyeliminować zniszczenie w strefie przypodporowej.
- 7.7. Odspojenie taśmy w obszarze maksymalnego momentu następowało przy odkształceniach rzędu 5-5.5‰, niezależnie od stopnia zbrojenia przekroju (w zakresie stosowanym w badaniach) i schematu obciążenia belki.

Efekt wzmocnienia można zwiększyć stosując taśmy o większym współczynniku sprężystości lub wprowadzając wstępne sprężenie taśm przed ich przyklejeniem.
- 7.8. Dobrą zgodność obliczeniowych odkształceń wzmocnionego elementu z wielkościami doświadczalnymi można osiągnąć stosując zasadę płaskiego przekroju oraz uwzględniając przenoszenie naprężeń normalnych przez beton strefy rozciąganej po zarysowaniu (tension stiffening).

7. CONCLUSIONS

On the basis of experimental results and theoretical analyses it can be stated that:

- 7.1. Use of CFRP strips bonded to the tensioned surface of reinforced concrete elements leads to the increase of their stiffness and bending capacity.
- 7.2. The degree of strengthening defined as the ratio of capacity of strengthened to not strengthened beam depends on many factors:
 - steel reinforcement ratio,
 - the strip type and reinforcement ratio referring to the strip,
 - shear reinforcement ratio,
 - distance from the strip ends to the supports,
 - bending moment distribution over the length of the element,
 - transverse forces distribution,
 - dimensions of the cross-section .
- 7.3. Tensile strength can not be reached because it debonds earlier from element surface. However strengthening ratio can be appreciable - particularly in elements with low reinforcement ratio of steel reinforcement.
- 7.4. Research indicated the possibility of two failure mechanisms differing in the cause and place of occurrence. First occurred next to the strip end and the other in the region of maximum bending moment.
- 7.5. De-bonding of the strip ends is connected with the yielding of steel reinforcement in the cross-section, in which the strip does not already transmit normal stresses.
- 7.6. Use of additional strip on both sides of the beam, results in moving of the critical cross-section away from the support. Thanks to the partial co-operation of bottom and side strips in transmitting external forces capacity of this cross-section is greater than that of cross-section through the end of the bottom strip. In this way the effectiveness of strengthening can be increased and even the destruction in the support region eliminated.
- 7.7. Strip de-bonding in the region of maximum bending moment followed at strain level of 5-5.5‰ independent of the steel reinforcement ratio in the cross-section (within the range of experimental test) and loading scheme of the beam.

Strengthening effect can be increased using the strips with greater elasticity coefficient or introducing pre-tensioning of strips before bonding.
- 7.8. Good agreement between theoretical strains in strengthened element and experimental values can be obtained applying the principle of plane cross-sections and allowing for the transmission of normal stresses by concrete in the tension zone (tension stiffening).

PODZIĘKOWANIE

Autorki dziękują firmie Sika Poland za nieodpłatne przekazanie materiałów kompozytowych, co umożliwiło zrealizowanie programu badań.

ACKNOWLEDGEMENT

Authors wish to express their sincere thanks to Sika-Poland for supplying free of charge the materials used for strengthening of tested beams.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] Brandt A. M., "O zastosowaniu uzbrojenia i sprężania konstrukcji prętami, ciągłymi taśmami z materiałów kompozytowych". *XLII Konferencja naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Komitetu Nauki PZiTb, Kraków - Krynica 1996, s. 169-174.*
- [2] Karta Techniczna nr 01; System Sika® CarboDur, *Dokument nr: DZT/0004/15.01.1998.*
- [3] Kamińska M. E., Kotynia R., Kozicki J., "O wpływie skracania zbrojenia podłużnego na nośność belek żelbetowych", *Proc. XLV Konferencji Naukowej KIL i WPAN i KN PZiTb, Krynica '96, t. 4, s. 45-52.*
- [4] Czkwianianc A., Kamińska M. E., "Metoda nieliniowej analizy żelbetowych elementów prętowych", *Proc. KILiW PAN IPPT, Studia z Zakresu Inżynierii nr 36, Warszawa 1993, s. 130.*
- [5] Nanni A., DiTomasso A., Arduini M.: Behavior of RC Beams Strengthened with Carbon FRP Sheets, Research Report Part II. Continuous Beams, University of Bologna, pp. 1-16, Italy 1997.
- [6] Kotynia R., "Niektóre aspekty wzmacniania belek na zginanie taśmami CFRP", *Proc. XLIII Konferencji Naukowej KIL i WPAN i KN PZiTb, Krynica '97, t. 4, s. 117-124.*

PRACE NIE PRZYWOŁYWANE W TEKŚCIE / REFERENCES NOT QUOTED IN THE TEXT

- [7] M'Bazaa I., Misshoun, M., Labossière P., „Strengthening of reinforced concrete beams with CFRP Sheets”, *Fiber Composites in Infrastructure, ICCI'96 January, 1996, pp. 746 ÷ 759.*
- [8] Malek A. M., Saadatmanesh H., Design Equations and Guidelines for Reinforced Concrete Beams Strengthened with FRP Plates,” *Proceedings of the Second International Conference on Composite in Infrastructure ICCI'98, Fiber Composite in Infrastructure, pp.603-616.*
- [9] Malek A. M., Saadatmanesh H., Ehsani M. R., „Prediction of Failure Load of R/S Beams Strengthened with FRP Plate Due to Stress Concentration at the Plate End”, *ACI Structural Journal Vol 95 (1), March - April 1998, pp. 142 - 152.*
- [10] Meier U., „Composites for Structural Repair and Retrofitting”, *Proceedings of the First International Conference on Fiber Composites in Infrastructure, ICCI 1996, pp.1202-1216.*
- [11] Norris T., Saadatmanesh H., Ehsani M. R., „Shear and Flexural Strengthening of R/C Beams with Carbon Fiber Sheets”, *Journal of Structural Engineering, July 1997, pp. 903 - 911.*
- [12] Ross A., Jermore D.M., Tedesco J.W., Hughes M. L., „Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Externally Bonded Composite Laminates”, *ACI Structural Journal March-April 1999, Vol. 96, No.2, pp. 212-220.*
- [13] Radomski W., „Nowe materiały w mostownictwie”, *XLV Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZiTb, Wrocław-Krynica 1999, Tom 6, s. 281-302.*
- [14] Brosens K., Van Gemert D., „Anchorage Design for Externally Bonded Carbon Fiber Reinforced Polymer Laminates”, *Fourth International Symposium Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures, ACI 1999, p.p.635 - 645.*
- [15] Cichocki M., „Odkształcalność i nośność zarysowanych belek żelbetowych wzmocnionych taśmami kompozytowymi CFRP”, *Inż. i Bud. nr 12/99 s. 698 – 703.*
- [16] Kamińska M.E., Kotynia R., „ Tests of RC beams strengthened with CFRP Plates”, *IABSE - Colloquium, Saving Buildings in Central and Eastern Europe, Berlin 1998 r.*
- [17] Kamińska M. E., Kotynia R., „Stan graniczny nośności przy zginaniu żelbetowych belek wzmocnionych taśmami CFRP”, *XLIV Konferencja Naukowa KILiW PAN., t. 4, s. 95-102, Krynica 1998 r.*
- [18] Kamińska M. E., Kotynia R., Discussion (96-S23/From the March-April 1999, *ACI Structural Journal*, 212-220) for paper by C. Allen Ross, David M. Jerome, Joseph W. Tedesco, and Mary L. Hughes , „Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Externally Bonded Composite Laminates”, *ACI Structural Journal, pp. 204-205, January - February 2000.*
- [19] Kotynia R., „Load bearing capacity and strains of reinforced concrete beams strengthened with carbon composite plates”, *3rd International PhD Symposium in Civil Engineering, v. II, pp. 193- 202 ,Vienna 2000.*

Załącznik

Wyniki pomiarów

Badania zostały wykonane w Laboratorium Katedry Budownictwa Betonowego.

Uczestniczyli w nich:

Adam Frątczak

Wojciech Klichowski

Monika Potapow

Andrzej Szcześniak

Andrzej Wierzbicki

oraz dyplomanci Katedry:

Anna Bogacz

Artur Kowalewski

Robert Łuszczzyński

Appendix

Results of measurements

Tests were carried out in the Laboratory of Department of Concrete Structures.

The participants were also the following:

Adam Frątczak

Wojciech Klichowski

Monika Potapow

Andrzej Szcześniak

Andrzej Wierzbicki

and graduated students of Department:

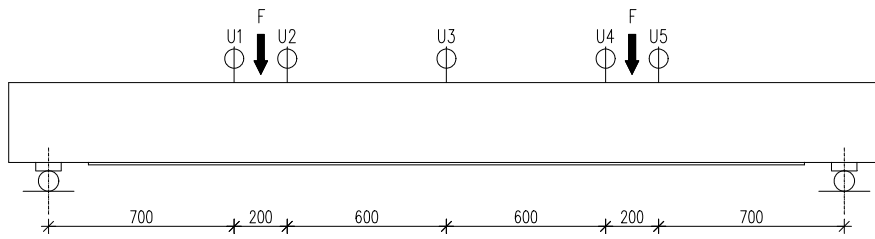
Anna Bogacz

Artur Kowalewski

Robert Łuszczzyński

W druku podano przykładowe tablice zawierające wyniki badań. Pozostałe materiały, dokumentujące przebieg badań, są dostępne w Katedrze Budownictwa Betonowego Politechniki Łódzkiej.

Example tables containing investigation results, are presented in print. Remaining materials, documenting the course of tests are available at the Department of Concrete Structures of Lodz Technical University.



B-08/S

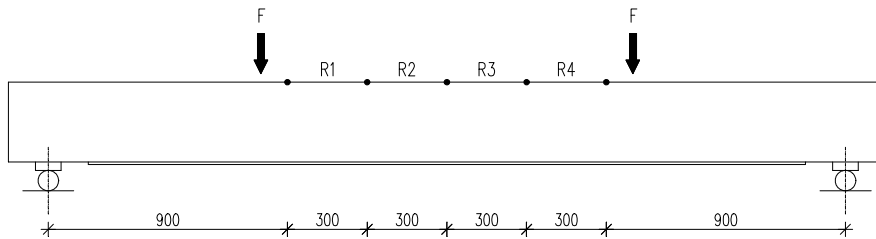
L=3.0m

Nr obciążenia	Pomiar pierwszy ostatni średni	Siła 2F kN	Ugięcia				
			u1	u2	u3	u4	u5
			mm				
1	p	20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	o		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	s		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	p	30	0.64	0.80	0.94	0.77	0.62
	o		0.64	0.80	0.95	0.78	0.63
	s						
3	p	40	1.30	1.62	1.89	1.56	1.27
	o		1.32	1.64	1.93	1.60	1.30
	s		1.31	1.63	1.92	1.58	1.29
4	p	50	2.02	2.49	2.93	2.43	2.01
	o		2.05	2.52	2.98	2.47	2.03
	s		2.04	2.51	2.96	2.45	2.02
5	p	60	2.70	3.30	3.91	3.24	2.68
	o		2.73	3.33	3.95	3.28	2.73
	s		2.72	3.32	3.94	3.26	2.72
6	p	70	3.45	4.21	5.02	4.14	3.48
	o		3.49	4.25	5.08	4.20	3.52
	s		3.48	4.23	5.05	4.17	3.50
7	p	80	4.19	5.07	6.09	5.00	4.22
	o		4.26	5.12	6.17	5.07	4.29
	s		4.23	5.10	6.14	5.04	4.26
8	p	90	4.99	6.00	7.25	5.96	5.05
	o		5.04	6.05	7.31	6.03	5.09
	s		5.02	6.03	7.28	5.99	5.08
9	p	100	5.80	6.94	8.36	6.89	5.85
	o		5.85	7.00	8.43	6.97	5.92
	s		5.83	6.97	8.40	6.93	5.89
10	p	110	6.59	7.89	9.47	7.87	6.69
	o		6.72	8.02	9.62	8.02	6.83
	s		6.67	7.97	9.57	7.97	6.80
11	p	90	6.24	7.46	8.91	7.42	6.34
	o		6.23	7.42	8.89	7.41	6.33
	s		6.23	7.43	8.90	7.41	6.33
12	p	60	5.36	6.39	7.64	6.36	5.44
	o		4.88	5.81	6.95	5.79	4.96
	s		4.95	5.91	7.05	5.88	5.03
13	p	60	4.88	5.83	6.95	5.79	4.96
	o		4.85	5.81	6.90	5.76	4.92
	s		4.86	5.81	6.92	5.77	4.94
14	p	30	2.91	3.49	4.04	3.44	2.94
	o		2.88	3.43	3.99	3.40	2.91
	s		2.89	3.45	4.01	3.42	2.92
15	p	6	1.26	1.48	1.64	1.46	1.27
	o		1.23	1.44	1.60	1.43	1.24
	s		1.24	1.45	1.61	1.43	1.25
16	p	30	2.26	2.72	3.12	2.67	2.28
	o		2.24	2.71	3.10	2.66	2.28
	s		2.25	2.70	3.11	2.66	2.28
17	p	60	3.94	4.75	5.60	4.69	4.01
	o		3.95	4.74	5.61	4.70	4.02
	s		3.95	4.75	5.61	4.70	4.01
18	p	90	5.71	6.85	8.18	6.80	5.81
	o		5.73	6.84	8.20	6.82	5.82
	s		5.72	6.84	8.19	6.81	5.82
19	p	110	6.93	8.28	9.90	8.25	7.03
	o		6.96	8.31	9.93	8.29	7.06
	s		6.95	8.29	9.92	8.27	7.05
20	p	6	1.25	1.48	1.63	1.45	1.24
	o		1.22	1.43	1.59	1.42	1.23
	s		1.23	1.45	1.61	1.43	1.24

Tablica A1. Ugięcia
Table A1. Deflections

21	p o s	110	6.99	8.36	9.97	8.32	7.09
			7.00	8.36	9.99	8.34	7.10
			6.99	8.36	9.98	8.32	7.09
22	p o s	6	1.26	1.48	1.64	1.45	1.26
			1.21	1.45	1.60	1.43	1.24
			1.24	1.46	1.61	1.43	1.24
23	p o s	110	7.04	8.42	10.04	8.37	7.12
			7.04	8.43	10.05	8.39	7.15
			7.04	8.42	10.04	8.38	7.14
24	p o s	60	4.91	5.89	6.97	5.82	4.97
			4.88	5.86	6.95	5.80	4.95
			4.89	5.86	6.96	5.80	4.96
25	p o s	30	2.86	3.46	3.97	3.38	2.88
			2.85	3.42	3.95	3.36	2.87
			2.85	3.44	3.95	3.37	2.87
26	p o s	6	1.27	1.52	1.66	1.48	1.28
			1.25	1.48	1.63	1.45	1.26
			1.26	1.49	1.65	1.46	1.27
27	p o s	30	2.37	2.87	3.28	2.81	2.40
			2.37	2.86	3.27	2.81	2.39
			2.37	2.86	3.28	2.80	2.40
28	p o s	60	4.17	5.02	5.91	4.94	4.22
			4.17	5.02	5.92	4.95	4.23
			4.17	5.01	5.92	4.94	4.23
29	p o s	90	5.92	7.09	8.45	7.03	6.01
			5.92	7.08	8.45	7.04	6.01
			5.92	7.08	8.45	7.03	6.01
30	p o s	110	7.12	8.51	10.14	8.46	7.21
			7.12	8.50	10.13	8.47	7.19
			7.12	8.50	10.14	8.46	7.21
31	p o s	120	7.76	9.28	11.03	9.22	7.85
			7.78	9.29	11.04	9.24	7.86
			7.77	9.28	11.04	9.23	7.85
32	p o s	130	8.45	10.10	11.99	10.03	8.53
			8.49	10.15	12.03	10.08	8.57
			8.47	10.13	12.01	10.06	8.55
33	p o s	136	8.89	10.63	12.58	10.56	8.96
			8.94	10.68	12.65	10.61	9.00
			8.93	10.66	12.63	10.58	8.99
34	p o s	142	9.61	11.46	13.56	11.37	9.65
			9.59	11.43	13.55	11.37	9.64
			9.60	11.44	13.55	11.36	9.64
35	p o s	148	9.96	11.88	14.09	11.81	10.01
			10.00	11.93	14.14	11.86	10.05
			9.99	11.91	14.12	11.83	10.03
36	p o s	154	10.42	12.43	14.74	12.35	10.46
			10.51	12.54	14.86	12.45	10.55
			10.47	12.49	14.82	12.41	10.51
37	p o s	160	10.96	13.09	15.53	12.98	10.99
			11.28	13.49	16.08	13.37	11.30
			11.13	13.30	15.81	13.18	11.15
38	p o s	164	12.26	14.70	17.66	14.62	12.29
			12.70	15.24	18.36	15.19	12.76
			12.55	15.06	18.14	15.01	12.61
39	p o s	168	13.47	16.19	19.52	16.18	13.54
			13.73	16.50	19.91	16.51	13.79
			13.63	16.38	19.76	16.38	13.70
40	p o s	172	14.54	17.51	21.09	17.52	14.62
			14.86	17.90	21.50	17.88	14.90
			14.72	17.73	21.32	17.72	14.78
41	p o s	176	15.74	18.97	22.72	18.90	15.72
			16.20	19.53	23.33	19.42	16.14
			16.02	19.32	23.09	19.21	15.98
42	p o s	180	16.90	20.37	24.34	20.29	16.84
			16.94	20.42	24.39	20.33	16.87

Pomiary ugięć wykonano przetwornikami przemieszczeń liniowych o zakresie 50mm
Deflection measurements were carried out by means of linear displacement
transducers of 50mm working range



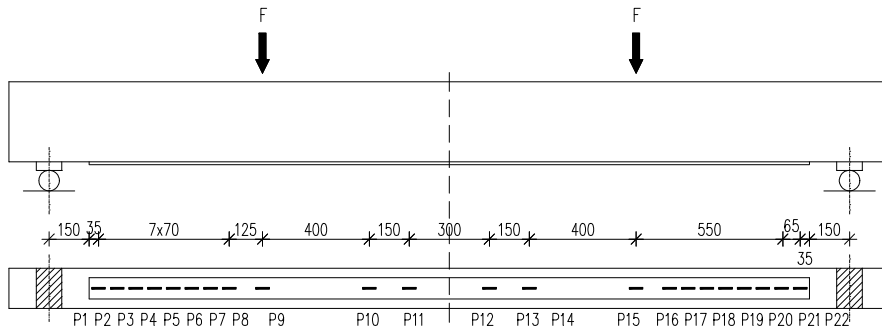
B-08/S

L=3.0m

Tablica A2. Odształcenia strefy ściskanej
Table A2. Strains of compression zone

Nr obciążenia	Pomiar pierwszy ostatni średni	Siła 2F kN	Odształcenia strefy ściskanej ϵ_c			
			R1	R2	R3	R4
			‰			
1	p o s	20	0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00
2	p o s	30	-0.19 -0.18	-0.12 -0.11	-0.15 -0.15	-0.16 -0.15
3	p o s	40	-0.30 -0.31 -0.31	-0.23 -0.23 -0.22	-0.26 -0.25 -0.26	-0.26 -0.26 -0.26
4	p o s	50	-0.42 -0.41 -0.41	-0.32 -0.33 -0.32	-0.33 -0.33 -0.33	-0.36 -0.36 -0.36
5	p o s	60	-0.52 -0.51 -0.51	-0.41 -0.41 -0.41	-0.42 -0.42 -0.42	-0.46 -0.46 -0.46
6	p o s	70	-0.62 -0.61 -0.62	-0.52 -0.52 -0.51	-0.53 -0.53 -0.53	-0.56 -0.56 -0.56
7	p o s	80	-0.72 -0.71 -0.71	-0.60 -0.60 -0.60	-0.62 -0.62 -0.62	-0.65 -0.64 -0.64
8	p o s	90	-0.82 -0.81 -0.81	-0.70 -0.70 -0.69	-0.72 -0.72 -0.72	-0.74 -0.73 -0.73
9	p o s	100	-0.92 -0.91 -0.91	-0.79 -0.79 -0.79	-0.82 -0.82 -0.82	-0.82 -0.82 -0.82
10	p o s	110	-1.00 -1.00 -1.00	-0.88 -0.88 -0.88	-0.91 -0.91 -0.91	-0.91 -0.90 -0.90
11	p o s	90	-0.95 -0.94 -0.94	-0.83 -0.82 -0.82	-0.84 -0.84 -0.84	-0.85 -0.85 -0.85
12	p o s	60	-0.85 -0.78 -0.79	-0.72 -0.67 -0.67	-0.72 -0.65 -0.67	-0.75 -0.69 -0.70
13	p o s	60	-0.80 -0.77 -0.78	-0.67 -0.67 -0.67	-0.66 -0.65 -0.65	-0.70 -0.67 -0.69
14	p o s	30	-0.54 -0.54 -0.54	-0.42 -0.42 -0.42	-0.40 -0.40 -0.40	-0.45 -0.46 -0.46
15	p o s	6	-0.25 -0.23 -0.24	-0.19 -0.18 -0.18	-0.13 -0.13 -0.13	-0.21 -0.21 -0.21
16	p o s	30	-0.45 -0.44 -0.44	-0.34 -0.34 -0.34	-0.33 -0.32 -0.33	-0.39 -0.38 -0.38
17	p o s	60	-0.67 -0.67 -0.67	-0.56 -0.56 -0.55	-0.55 -0.55 -0.55	-0.61 -0.60 -0.60
18	p o s	90	-0.89 -0.89 -0.89	-0.78 -0.77 -0.77	-0.78 -0.78 -0.79	-0.82 -0.81 -0.81
19	p o s	110	-1.06 -1.04 -1.05	-0.92 -0.91 -0.91	-0.93 -0.93 -0.94	-0.96 -0.95 -0.95
20	p o s	6	-0.26 -0.24 -0.25	-0.19 -0.19 -0.18	-0.13 -0.12 -0.13	-0.22 -0.20 -0.20

21	p o s	110	-1.06 -1.04 -1.05	-0.93 -0.92 -0.92	-0.94 -0.93 -0.94	-0.96 -0.94 -0.94
22	p o s	6	-0.27 -0.25 -0.25	-0.19 -0.18 -0.19	-0.14 -0.12 -0.13	-0.21 -0.19 -0.20
23	p o s	110	-1.06 -1.05 -1.05	-0.93 -0.92 -0.92	-0.94 -0.94 -0.94	-0.95 -0.94 -0.95
24	p o s	60	-0.83 -0.81 -0.82	-0.68 -0.68 -0.68	-0.66 -0.65 -0.65	-0.68 -0.67 -0.67
25	p o s	30	-0.56 -0.55 -0.55	-0.43 -0.42 -0.42	-0.40 -0.39 -0.40	-0.43 -0.42 -0.42
26	p o s	6	-0.28 -0.27 -0.28	-0.20 -0.19 -0.19	-0.14 -0.13 -0.14	-0.20 -0.19 -0.19
27	p o s	30	-0.48 -0.47 -0.47	-0.36 -0.35 -0.35	-0.33 -0.33 -0.33	-0.38 -0.37 -0.38
28	p o s	60	-0.71 -0.69 -0.70	-0.59 -0.58 -0.58	-0.57 -0.56 -0.57	-0.60 -0.59 -0.59
29	p o s	90	-0.93 -0.91 -0.92	-0.79 -0.79 -0.79	-0.79 -0.79 -0.79	-0.81 -0.80 -0.80
30	p o s	110	-1.08 -1.05 -1.06	-0.93 -0.93 -0.93	-0.94 -0.94 -0.94	-0.95 -0.93 -0.94
31	p o s	120	-1.16 -1.15 -1.15	-1.02 -1.01 -1.01	-1.02 -1.02 -1.03	-1.02 -1.02 -1.02
32	p o s	130	-1.24 -1.24 -1.24	-1.10 -1.10 -1.10	-1.11 -1.11 -1.11	-1.10 -1.10 -1.10
33	p o s	136	-1.30 -1.29 -1.29	-1.15 -1.15 -1.15	-1.17 -1.16 -1.17	-1.16 -1.15 -1.15
34	p o s	142	-1.40 -1.39 -1.39	-1.24 -1.24 -1.24	-1.26 -1.25 -1.26	-1.24 -1.24 -1.24
35	p o s	148	-1.43 -1.43 -1.43	-1.29 -1.29 -1.29	-1.31 -1.30 -1.31	-1.28 -1.28 -1.28
36	p o s	154	-1.48 -1.47 -1.48	-1.34 -1.34 -1.34	-1.36 -1.36 -1.36	-1.33 -1.32 -1.33
37	p o s	160	-1.53 -1.54 -1.53	-1.39 -1.45 -1.42	-1.42 -1.43 -1.43	-1.37 -1.37 -1.37
38	p o s	164	-1.64 -1.68 -1.66	-1.54 -1.58 -1.56	-1.56 -1.60 -1.59	-1.48 -1.52 -1.51
39	p o s	168	-1.75 -1.76 -1.76	-1.65 -1.67 -1.66	-1.67 -1.69 -1.69	-1.61 -1.63 -1.62
40	p o s	172	-1.85 -1.88 -1.87	-1.74 -1.76 -1.75	-1.78 -1.80 -1.79	-1.72 -1.73 -1.72
41	p o s	176	-1.97 -1.98 -1.98	-1.84 -1.86 -1.85	-1.88 -1.91 -1.90	-1.81 -1.83 -1.82
42	p o s	180	-2.07 -2.06	-1.92 -1.92	-1.99 -1.99	-1.91 -1.90



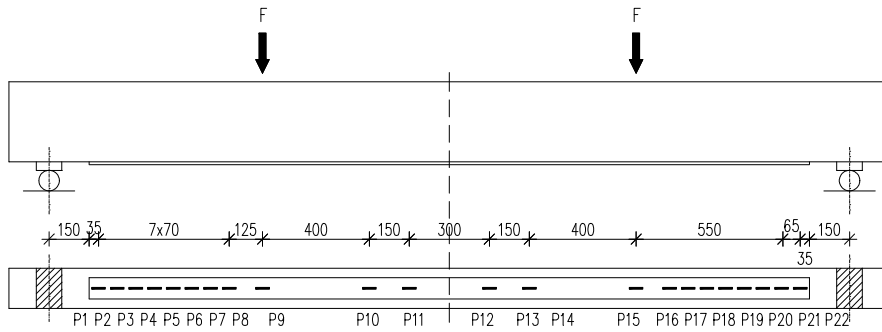
B-08/S

L=3.0m

Tablica A3. Odształcenia taśmy ϵ_p
 Table A3. Strains of the strip ϵ_p

Nr obciążenia	Pomiar pierwszy ostatni średni	Siła 2F kN	Odształcenia taśmy / Strains of the strip ϵ_p [%]										
			P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
1	p	20	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	o		0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	s		0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	p	30	0.02	0.03		0.04	0.05	0.08	0.16	0.21	0.25	0.20	0.19
	o		0.00	0.01		0.03	0.04	0.07	0.15	0.20	0.23	0.18	0.17
	s												
3	p	40	0.03	0.05		0.09	0.10	0.21	0.36	0.44	0.49	0.38	0.37
	o		0.02	0.03		0.09	0.10	0.21	0.36	0.43	0.47	0.36	0.36
	s		0.02	0.03		0.09	0.10	0.21	0.36	0.43	0.48	0.37	0.36
4	p	50	0.04	0.06		0.21	0.29	0.42	0.55	0.64	0.70	0.56	0.58
	o		0.03	0.05		0.24	0.31	0.44	0.55	0.64	0.67	0.54	0.57
	s		0.03	0.05		0.23	0.30	0.44	0.55	0.64	0.68	0.55	0.57
5	p	60	0.05	0.10		0.38	0.47	0.67	0.73	0.83	0.88	0.74	0.75
	o		0.04	0.09		0.40	0.47	0.68	0.73	0.83	0.87	0.73	0.74
	s		0.04	0.09		0.39	0.47	0.67	0.73	0.83	0.87	0.74	0.74
6	p	70	0.07	0.17		0.55	0.63	0.88	0.94	1.04	1.08	0.95	0.95
	o		0.06	0.17		0.57	0.64	0.88	0.94	1.04	1.07	0.94	0.95
	s		0.06	0.17		0.56	0.63	0.88	0.94	1.03	1.07	0.94	0.94
7	p	80	0.11	0.29		0.72	0.81	1.05	1.11	1.22	1.26	1.13	1.12
	o		0.12	0.30		0.74	0.83	1.06	1.13	1.22	1.27	1.13	1.13
	s		0.11	0.30		0.73	0.82	1.06	1.12	1.22	1.26	1.13	1.12
8	p	90	0.19	0.42		0.90	1.00	1.24	1.32	1.44	1.48	1.34	1.32
	o		0.20	0.43		0.92	1.01	1.25	1.33	1.43	1.46	1.32	1.31
	s		0.19	0.42		0.91	1.00	1.24	1.32	1.43	1.46	1.32	1.31
9	p	100	0.39	0.70		1.10	1.19	1.48	1.53	1.63	1.66	1.52	1.53
	o		0.39	0.69		1.12	1.19	1.48	1.54	1.62	1.64	1.50	1.52
	s		0.39	0.69		1.11	1.19	1.48	1.54	1.63	1.65	1.51	1.52
10	p	110	0.36	0.77		1.24	1.33	1.70	1.76	1.81	1.84	1.71	1.71
	o		0.27	0.71		1.26	1.34	1.71	1.77	1.81	1.83	1.70	1.70
	s		0.30	0.72		1.25	1.33	1.70	1.77	1.81	1.83	1.70	1.70
11	p	90	0.25	0.68		1.22	1.30	1.64	1.65	1.69	1.70	1.55	1.57
	o		0.25	0.66		1.22	1.29	1.63	1.64	1.68	1.68	1.53	1.55
	s		0.25	0.67		1.22	1.29	1.63	1.65	1.68	1.69	1.54	1.56
12	p	60	0.23	0.62		1.11	1.17	1.46	1.44	1.47	1.47	1.32	1.31
	o		0.21	0.56		1.04	1.07	1.34	1.33	1.34	1.31	1.17	1.17
	s		0.21	0.57		1.05	1.09	1.36	1.35	1.36	1.34	1.19	1.19
13	p	60	0.21	0.56		1.04	1.08	1.34	1.33	1.35	1.33	1.18	1.18
	o		0.21	0.56		1.04	1.08	1.34	1.33	1.34	1.32	1.17	1.17
	s		0.20	0.55		1.04	1.07	1.33	1.32	1.34	1.31	1.16	1.16
14	p	30	0.17	0.40		0.72	0.72	0.92	0.86	0.86	0.81	0.63	0.65
	o		0.15	0.38		0.71	0.70	0.89	0.84	0.82	0.76	0.59	0.62
	s		0.16	0.38		0.71	0.71	0.90	0.85	0.84	0.78	0.61	0.63
15	p	6	0.12	0.25		0.43	0.42	0.54	0.46	0.43	0.36	0.17	0.17
	o		0.12	0.24		0.43	0.42	0.53	0.45	0.42	0.34	0.16	0.16
	s		0.12	0.24		0.43	0.41	0.53	0.46	0.42	0.35	0.16	0.17
16	p	30	0.14	0.30		0.53	0.53	0.69	0.65	0.66	0.63	0.46	0.47
	o		0.12	0.27		0.53	0.51	0.67	0.63	0.63	0.58	0.42	0.42
	s		0.13	0.28		0.53	0.52	0.68	0.64	0.65	0.60	0.44	0.44
17	p	60	0.16	0.40		0.79	0.82	1.06	1.06	1.09	1.06	0.92	0.93
	o		0.15	0.39		0.79	0.81	1.05	1.06	1.08	1.04	0.90	0.91
	s		0.16	0.40		0.79	0.81	1.05	1.06	1.08	1.05	0.91	0.92
18	p	90	0.20	0.55		1.08	1.13	1.46	1.49	1.55	1.55	1.41	1.42
	o		0.20	0.54		1.08	1.12	1.46	1.49	1.54	1.53	1.39	1.41
	s		0.21	0.55		1.08	1.13	1.46	1.49	1.55	1.54	1.40	1.42

19	p o s	110	0.25 0.25 0.24	0.66 0.66 0.65		1.28 1.30 1.29	1.34 1.36 1.34	1.75 1.76 1.75	1.80 1.81 1.80	1.85 1.86 1.85	1.86 1.86 1.85	1.73 1.73 1.72	1.73 1.73 1.72
20	p o s	6	0.13 0.11 0.12	0.25 0.23 0.24		0.45 0.43 0.44	0.43 0.40 0.41	0.56 0.53 0.54	0.47 0.45 0.46	0.45 0.41 0.43	0.38 0.33 0.35	0.19 0.15 0.16	0.19 0.15 0.17
21	p o s	110	0.24 0.23 0.23	0.65 0.63 0.64		1.29 1.29 1.29	1.35 1.35 1.35	1.77 1.77 1.77	1.81 1.81 1.81	1.86 1.85 1.86	1.86 1.84 1.85	1.73 1.71 1.72	1.73 1.71 1.72
22	p o s	6	0.12 0.11 0.11	0.24 0.22 0.23		0.44 0.43 0.43	0.42 0.41 0.41	0.55 0.53 0.54	0.46 0.45 0.45	0.44 0.41 0.42	0.35 0.32 0.33	0.17 0.14 0.15	0.17 0.15 0.16
23	p o s	110	0.23 0.22 0.23	0.64 0.63 0.63		1.30 1.30 1.30	1.36 1.35 1.35	1.79 1.78 1.78	1.82 1.81 1.81	1.87 1.85 1.86	1.86 1.84 1.85	1.74 1.72 1.73	1.73 1.72 1.72
24	p o s	60	0.19 0.17 0.18	0.50 0.48 0.49		1.02 1.02 1.02	1.06 1.05 1.05	1.35 1.33 1.34	1.31 1.30 1.30	1.34 1.32 1.33	1.30 1.27 1.28	1.16 1.13 1.14	1.15 1.13 1.14
25	p o s	30	0.15 0.14 0.14	0.35 0.33 0.33		0.69 0.69 0.69	0.69 0.68 0.68	0.88 0.87 0.88	0.81 0.81 0.81	0.82 0.81 0.81	0.76 0.74 0.74	0.59 0.58 0.58	0.61 0.60 0.60
26	p o s	6	0.14 0.13 0.12	0.25 0.23 0.23		0.46 0.45 0.45	0.45 0.44 0.43	0.56 0.55 0.55	0.47 0.46 0.46	0.46 0.44 0.44	0.39 0.36 0.36	0.19 0.17 0.16	0.19 0.17 0.16
27	p o s	30	0.13 0.12 0.12	0.27 0.25 0.26		0.56 0.55 0.55	0.55 0.54 0.54	0.73 0.71 0.71	0.67 0.66 0.66	0.68 0.66 0.67	0.64 0.60 0.62	0.48 0.45 0.46	0.48 0.45 0.46
28	p o s	60	0.16 0.16 0.15	0.39 0.39 0.39		0.85 0.85 0.85	0.87 0.87 0.86	1.14 1.14 1.14	1.11 1.11 1.11	1.14 1.13 1.13	1.10 1.08 1.08	0.97 0.94 0.95	0.97 0.96 0.96
29	p o s	90	0.20 0.20 0.20	0.53 0.52 0.52		1.13 1.12 1.12	1.18 1.17 1.17	1.55 1.54 1.54	1.54 1.53 1.53	1.60 1.58 1.58	1.58 1.55 1.56	1.44 1.41 1.42	1.45 1.43 1.43
30	p o s	110	0.23 0.22 0.22	0.63 0.61 0.62		1.31 1.31 1.31	1.38 1.37 1.37	1.81 1.80 1.80	1.83 1.82 1.82	1.88 1.86 1.87	1.87 1.85 1.86	1.75 1.72 1.73	1.74 1.72 1.73
31	p o s	120	0.23 0.22 0.22	0.66 0.66 0.66		1.40 1.40 1.40	1.48 1.48 1.48	1.94 1.94 1.94	1.96 1.96 1.96	2.02 2.01 2.02	2.02 2.00 2.00	1.90 1.89 1.89	1.90 1.89 1.89
32	p o s	130	0.23 0.23 0.23	0.71 0.70 0.71		1.51 1.52 1.51	1.61 1.62 1.61	2.09 2.09 2.09	2.11 2.12 2.11	2.20 2.19 2.19	2.20 2.19 2.19	2.08 2.06 2.06	2.06 2.06 2.06
33	p o s	136	0.24 0.23 0.23	0.74 0.73 0.73		1.58 1.58 1.58	1.71 1.72 1.71	2.18 2.17 2.17	2.21 2.21 2.21	2.30 2.29 2.29	2.31 2.29 2.29	2.18 2.16 2.17	2.17 2.15 2.16
34	p o s	142	0.24 0.24 0.24	0.77 0.77 0.77		1.67 1.68 1.67	1.86 1.85 1.86	2.30 2.30 2.30	2.34 2.34 2.34	2.44 2.42 2.43	2.45 2.42 2.43	2.32 2.30 2.31	2.32 2.31 2.31
35	p o s	148	0.24 0.23 0.23	0.78 0.78 0.78		1.72 1.73 1.72	1.91 1.92 1.91	2.38 2.38 2.38	2.41 2.42 2.42	2.51 2.51 2.51	2.52 2.51 2.52	2.41 2.40 2.40	2.41 2.41 2.41
36	p o s	154	0.25 0.23 0.24	0.81 0.79 0.80		1.79 1.80 1.80	2.01 2.03 2.02	2.48 2.47 2.47	2.51 2.51 2.51	2.61 2.61 2.61	2.64 2.63 2.63	2.55 2.54 2.55	2.54 2.53 2.53
37	p o s	160	0.24 0.23 0.23	0.82 0.81 0.82		1.86 1.87 1.86	2.11 2.12 2.11	2.56 2.56 2.56	2.61 2.62 2.61	2.72 2.72 2.71	2.75 2.74 2.74	2.70 3.18 3.00	2.70 3.04 2.86
38	p o s	164	0.24 0.23 0.23	0.85 0.85 0.85		1.93 1.95 1.95	2.21 2.23 2.22	2.66 2.67 2.67	2.74 2.76 2.75	2.83 2.87 2.85	2.90 3.15 2.99	3.52 3.64 3.60	3.46 3.57 3.53
39	p o s	168	0.24 0.21 0.22	0.87 0.82 0.85		2.00 2.00 2.00	2.29 2.29 2.29	2.75 2.76 2.76	2.86 2.88 2.87	3.05 3.10 3.08	3.67 3.73 3.70	3.88 3.94 3.92	3.80 3.88 3.85
40	p o s	172	0.16 0.14 0.15	0.84 0.82 0.83		2.06 2.06 2.06	2.37 2.38 2.38	2.86 2.88 2.87	3.01 3.08 3.05	3.28 3.37 3.33	4.02 4.12 4.07	4.25 4.32 4.30	4.19 4.26 4.23
41	p o s	176	0.13 0.09 0.10	0.85 0.85 0.85		2.15 2.20 2.19	2.51 2.61 2.58	3.07 3.21 3.17	3.46 3.70 3.64	3.73 3.92 3.87	4.38 4.48 4.44	4.60 4.69 4.65	4.55 4.66 4.62
42	p o s	180	0.08 0.05	0.82 0.73		2.25 2.22	2.70 2.70	3.33 3.34	3.88 3.89	4.11 4.12	4.65 4.65	4.90 4.90	4.85 4.86



B-08/S

L=3.0m

Tablica A4. Odształcenia taśmy ϵ_p
Table A4. Strains of the strip ϵ_p

Nr obciążenia	Pomiar pierwszy ostatni średni	Siła 2F kN	Odształcenia taśmy / Strains of the strip ϵ_p [%]										Krzywizna 1/m	
			P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20	P21		P22
1	p	20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			0.00	0.00	0.00	0.00	0.00000
	o		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			0.00	0.00	0.00	0.00	0.00000
	s		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			0.00	0.00	0.00	0.00	0.00000
2	p	30	0.22	0.24	0.23	0.11	0.06			0.04	0.03	0.02	0.02	0.00122
	o		0.19	0.22	0.22	0.10	0.06			0.02	0.02	0.01	0.00	0.00112
	s													
3	p	40	0.39	0.43	0.44	0.30	0.18			0.06	0.04	0.03	0.02	0.00216
	o		0.37	0.42	0.43	0.32	0.23			0.05	0.03	0.02	0.01	0.00212
	s		0.38	0.42	0.43	0.31	0.21			0.05	0.04	0.02	0.01	0.00214
4	p	50	0.58	0.63	0.63	0.58	0.51			0.10	0.06	0.05	0.03	0.00314
	o		0.56	0.61	0.62	0.58	0.51			0.10	0.05	0.03	0.01	0.00308
	s		0.57	0.62	0.63	0.58	0.51			0.10	0.05	0.03	0.02	0.00310
5	p	60	0.75	0.81	0.82	0.79	0.70			0.23	0.10	0.05	0.03	0.00403
	o		0.73	0.80	0.81	0.78	0.71			0.24	0.10	0.04	0.02	0.00399
	s		0.74	0.80	0.82	0.78	0.71			0.23	0.10	0.05	0.02	0.00400
6	p	70	0.93	1.01	1.02	1.02	0.93			0.43	0.22	0.09	0.05	0.00502
	o		0.93	0.99	1.01	1.02	0.94			0.44	0.24	0.08	0.03	0.00499
	s		0.93	1.00	1.01	1.02	0.93			0.43	0.23	0.09	0.04	0.00499
7	p	80	1.13	1.20	1.21	1.20	1.12			0.60	0.38	0.14	0.07	0.00595
	o		1.13	1.19	1.21	1.21	1.13			0.63	0.42	0.15	0.06	0.00593
	s		1.13	1.20	1.21	1.20	1.12			0.62	0.40	0.15	0.06	0.00594
8	p	90	1.34	1.40	1.42	1.43	1.34			0.82	0.57	0.25	0.11	0.00695
	o		1.32	1.39	1.41	1.44	1.35			0.83	0.58	0.25	0.10	0.00688
	s		1.32	1.39	1.41	1.43	1.35			0.82	0.58	0.25	0.10	0.00690
9	p	100	1.53	1.59	1.61	1.64	1.54			0.99	0.72	0.45	0.18	0.00789
	o		1.51	1.58	1.60	1.63	1.54			1.00	0.75	0.54	0.23	0.00783
	s		1.52	1.58	1.60	1.63	1.54			0.99	0.74	0.51	0.21	0.00786
10	p	110	1.70	1.77	1.79	1.82	1.71			1.14	0.96	0.82	0.39	0.00878
	o		1.69	1.75	1.79	1.81	1.71			1.17	0.98	0.78	0.29	0.00873
	s		1.69	1.76	1.79	1.81	1.71			1.16	0.97	0.78	0.30	0.00875
11	p	90	1.56	1.64	1.66	1.70	1.61			1.16	0.97	0.78	0.30	0.00812
	o		1.54	1.62	1.64	1.69	1.61			1.15	0.96	0.76	0.29	0.00805
	s		1.55	1.62	1.65	1.70	1.61			1.15	0.97	0.77	0.29	0.00807
12	p	60	1.31	1.39	1.42	1.49	1.42			1.07	0.90	0.72	0.29	0.00694
	o		1.16	1.25	1.28	1.35	1.31			0.99	0.84	0.66	0.26	0.00625
	s		1.19	1.27	1.31	1.37	1.32			1.00	0.85	0.67	0.26	0.00636
13	p	60	1.18	1.26	1.29	1.35	1.30			1.00	0.84	0.67	0.27	0.00633
	o		1.17	1.25	1.28	1.35	1.30			0.99	0.84	0.66	0.27	0.00622
	s		1.17	1.25	1.28	1.34	1.30			0.99	0.83	0.66	0.26	0.00625
14	p	30	0.65	0.73	0.77	0.87	0.85			0.70	0.60	0.50	0.23	0.00371
	o		0.61	0.69	0.74	0.84	0.83			0.68	0.58	0.47	0.21	0.00359
	s		0.63	0.70	0.75	0.85	0.84			0.68	0.58	0.49	0.22	0.00364
15	p	6	0.19	0.27	0.33	0.45	0.48			0.44	0.38	0.32	0.17	0.00131
	o		0.18	0.26	0.32	0.44	0.47			0.44	0.37	0.31	0.16	0.00124
	s		0.18	0.26	0.32	0.45	0.48			0.44	0.37	0.31	0.17	0.00127
16	p	30	0.47	0.54	0.59	0.67	0.66			0.53	0.46	0.38	0.19	0.00286
	o		0.44	0.51	0.56	0.64	0.64			0.50	0.43	0.35	0.16	0.00270
	s		0.45	0.52	0.57	0.65	0.65			0.51	0.44	0.36	0.17	0.00278
17	p	60	0.92	0.99	1.03	1.08	1.06			0.75	0.63	0.51	0.20	0.00510
	o		0.90	0.97	1.02	1.08	1.06			0.74	0.63	0.50	0.19	0.00503
	s		0.90	0.98	1.02	1.08	1.06			0.74	0.63	0.50	0.19	0.00506
18	p	90	1.41	1.48	1.50	1.54	1.47			1.02	0.84	0.66	0.25	0.00745
	o		1.40	1.46	1.49	1.53	1.47			1.02	0.84	0.66	0.24	0.00739
	s		1.41	1.47	1.50	1.54	1.47			1.02	0.85	0.66	0.25	0.00744

19	p o s	110	1.72 1.72 1.72	1.79 1.79 1.78	1.81 1.81 1.81	1.84 1.84 1.84	1.74 1.75 1.74			1.20 1.21 1.20	0.98 0.99 0.98	0.78 0.78 0.77	0.29 0.29 0.28	0.00899 0.00896 0.00896
20	p o s	6	0.20 0.17 0.19	0.28 0.25 0.26	0.33 0.31 0.32	0.46 0.43 0.45	0.48 0.47 0.47			0.45 0.43 0.44	0.38 0.36 0.37	0.33 0.30 0.31	0.18 0.16 0.17	0.00138 0.00121 0.00128
21	p o s	110	1.73 1.71 1.72	1.80 1.78 1.79	1.82 1.80 1.81	1.84 1.83 1.84	1.75 1.74 1.75			1.22 1.21 1.21	0.99 0.98 0.99	0.78 0.76 0.77	0.29 0.27 0.28	0.00902 0.00892 0.00895
22	p o s	6	0.19 0.17 0.18	0.27 0.24 0.25	0.32 0.30 0.31	0.44 0.42 0.43	0.47 0.46 0.47			0.44 0.43 0.43	0.37 0.35 0.36	0.31 0.29 0.30	0.17 0.15 0.16	0.00134 0.00119 0.00125
23	p o s	110	1.73 1.71 1.72	1.80 1.78 1.79	1.82 1.81 1.82	1.85 1.84 1.84	1.75 1.75 1.75			1.22 1.22 1.22	0.99 0.98 0.99	0.77 0.76 0.77	0.28 0.27 0.28	0.00902 0.00894 0.00898
24	p o s	60	1.16 1.13 1.14	1.23 1.21 1.22	1.27 1.25 1.26	1.32 1.30 1.31	1.29 1.28 1.29			1.00 0.98 0.98	0.81 0.80 0.81	0.64 0.63 0.63	0.26 0.24 0.25	0.00626 0.00615 0.00619
25	p o s	30	0.61 0.60 0.60	0.68 0.67 0.67	0.72 0.71 0.71	0.81 0.80 0.81	0.82 0.81 0.81			0.67 0.67 0.66	0.56 0.55 0.55	0.46 0.45 0.45	0.20 0.20 0.20	0.00358 0.00350 0.00353
26	p o s	6	0.21 0.19 0.19	0.29 0.26 0.26	0.34 0.32 0.31	0.46 0.45 0.44	0.49 0.48 0.48			0.47 0.45 0.45	0.38 0.37 0.37	0.33 0.31 0.31	0.20 0.17 0.18	0.00139 0.00130 0.00131
27	p o s	30	0.50 0.47 0.48	0.55 0.53 0.54	0.59 0.57 0.58	0.68 0.66 0.67	0.67 0.66 0.67			0.54 0.53 0.53	0.45 0.44 0.44	0.38 0.36 0.37	0.19 0.18 0.18	0.00295 0.00284 0.00288
28	p o s	60	0.96 0.95 0.95	1.03 1.02 1.02	1.07 1.05 1.06	1.13 1.12 1.13	1.11 1.11 1.10			0.80 0.80 0.80	0.67 0.66 0.66	0.53 0.52 0.52	0.22 0.21 0.21	0.00530 0.00522 0.00524
29	p o s	90	1.46 1.42 1.43	1.51 1.49 1.49	1.53 1.51 1.52	1.58 1.56 1.57	1.51 1.50 1.51			1.08 1.06 1.07	0.87 0.86 0.86	0.68 0.67 0.67	0.27 0.25 0.26	0.00761 0.00749 0.00753
30	p o s	110	1.74 1.72 1.73	1.80 1.79 1.79	1.83 1.82 1.82	1.87 1.85 1.85	1.77 1.76 1.76			1.25 1.23 1.24	1.00 0.99 0.99	0.78 0.77 0.77	0.30 0.28 0.29	0.00907 0.00896 0.00900
31	p o s	120	1.90 1.90 1.90	1.95 1.94 1.94	1.98 1.97 1.97	2.01 1.99 2.00	1.91 1.90 1.91			1.34 1.32 1.33	1.06 1.05 1.06	0.84 0.82 0.83	0.31 0.29 0.30	0.00985 0.00979 0.00981
32	p o s	130	2.08 2.06 2.07	2.13 2.12 2.13	2.16 2.15 2.15	2.15 2.14 2.15	2.05 2.05 2.05			1.42 1.43 1.42	1.13 1.13 1.13	0.88 0.88 0.88	0.32 0.32 0.32	0.01070 0.01065 0.01067
33	p o s	136	2.18 2.16 2.17	2.24 2.23 2.23	2.26 2.25 2.25	2.26 2.25 2.25	2.14 2.14 2.14			1.50 1.49 1.49	1.19 1.18 1.18	0.93 0.91 0.92	0.34 0.32 0.33	0.01123 0.01115 0.01118
34	p o s	142	2.32 2.30 2.31	2.38 2.37 2.38	2.40 2.39 2.40	2.40 2.39 2.39	2.26 2.25 2.26			1.59 1.58 1.58	1.25 1.24 1.24	0.93 0.91 0.92	0.35 0.33 0.34	0.01202 0.01195 0.01198
35	p o s	148	2.41 2.41 2.41	2.48 2.48 2.48	2.48 2.48 2.47	2.48 2.48 2.34	2.34 2.34 2.34			1.64 1.64 1.63	1.28 1.27 1.28	0.95 0.93 0.94	0.35 0.34 0.34	0.01246 0.01244 0.01246
36	p o s	154	2.53 2.52 2.53	2.60 2.60 2.60	2.60 2.60 2.60	2.57 2.57 2.57	2.42 2.43 2.43			1.70 1.68 1.69	1.31 1.26 1.27	0.94 0.78 0.83	0.34 0.18 0.23	0.01305 0.01300 0.01303
37	p o s	160	2.66 2.86 2.74	2.74 2.84 2.79	2.71 2.72 2.71	2.66 2.66 2.66	2.51 2.52 2.51			1.75 1.75 1.74	1.30 1.29 1.29	0.80 0.76 0.77	0.16 0.12 0.14	0.01370 0.01470 0.01422
38	p o s	164	3.41 3.52 3.49	3.40 3.55 3.50	2.86 2.92 2.90	2.78 2.80 2.79	2.61 2.62 2.62			1.82 1.83 1.83	1.34 1.33 1.34	0.77 0.73 0.75	0.11 0.08 0.09	0.01659 0.01713 0.01696
39	p o s	168	3.75 3.82 3.80	3.81 3.91 3.88	3.54 3.61 3.59	3.03 3.07 3.06	2.75 2.77 2.76			1.88 1.88 1.88	1.37 1.36 1.36	0.74 0.72 0.73	0.08 0.06 0.06	0.01819 0.01850 0.01839
40	p o s	172	4.11 4.19 4.16	4.21 4.29 4.25	3.87 3.93 3.90	3.34 3.40 3.38	2.89 2.93 2.91			1.93 1.93 1.93	1.40 1.40 1.40	0.73 0.72 0.73	0.06 0.05 0.05	0.01979 0.02010 0.01997
41	p o s	176	4.47 4.58 4.54	4.57 4.67 4.63	4.19 4.30 4.26	3.63 3.74 3.70	3.06 3.13 3.11			1.99 2.00 2.00	1.44 1.44 1.44	0.73 0.70 0.71	0.04 0.03 0.04	0.02130 0.02171 0.02154
42	p o s	180	4.79 4.80	4.88 4.89	4.52 4.54	4.02 4.06	3.29 3.31			2.03 2.04	1.47 1.47	0.69 0.69	0.01 0.01	0.02264 0.02267